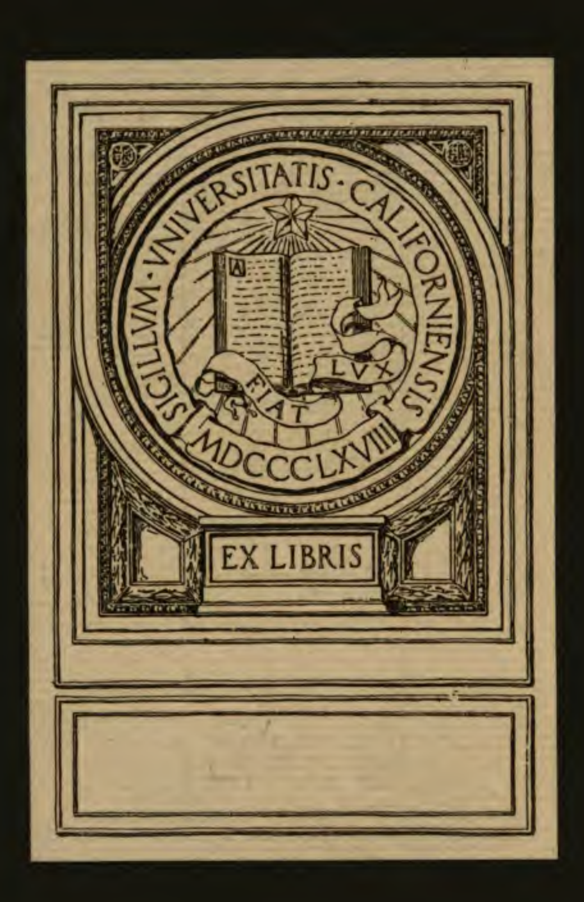



SIGILLVM · VNIVERSITATIS · CALIFORNIENSIS
FIAT LVX
MDCCCLXVIII
EX LIBRIS

5

SAMMLUNG VIEWEG

TAGESFRAGEN AUS DEN GEBIETEN DER NATURWISSENSCHAFTEN UND DER TECHNIK

Heft 9/10
(Doppelheft)

Verflüssigung der Kohle und Herstellung der Sonnentemperatur

Von

Dr. O. Lummer



FRIEDR. VIEWEG & SOHN BRAUNSCHWEIG



Die **„Sammlung Vieweg"** hat sich die Aufgabe gestellt, Wissens- und Forschungsgebiete, Theorien, chemisch-technische Verfahren usw., die im Stadium der Entwicklung stehen, durch zusammenfassende Behandlung unter Beifügung der wichtigsten Literaturangaben weiteren Kreisen bekanntzumachen und ihren **augenblicklichen Entwicklungsstand zu beleuchten.** Sie will dadurch die Orientierung erleichtern und die Richtung zu zeigen suchen, welche die weitere Forschung einzuschlagen hat.

Verzeichnis der bisher erschienenen Hefte siehe dritte Umschlagseite.

Als Herausgeber der einzelnen Gebiete, auf welche sich die Sammlung Vieweg zunächst erstreckt, sind tätig und zwar für:

Physik (theoretische und praktische, und mathematische Probleme):

Herr Professor **Dr. Karl Scheel,** Physikal.-Techn. Reichsanstalt, Charlottenburg;

Kosmische Physik (Astrophysik, Meteorologie und wissenschaftliche Luftfahrt — Aerologie — Geophysik):

Herr Geh. Reg.-Rat Professor **Dr. med. et phil. R. Assmann,** Königl. Aeronaut. Observatorium Lindenberg (Kr. Beeskow);

Chemie (Allgemeine, Organische und Anorganische Chemie, Physikal. Chemie, Elektrochemie, Technische Chemie, Chemie in ihrer Anwendung auf Künste und Gewerbe, Photochemie, Metallurgie, Bergbau):

Herr Professor **Dr. B. Neumann,** Techn. Hochschule, Breslau;

Technik (Elektro-, Maschinen-, Schiffbautechnik, Flugtechnik, Motoren, Brückenbau):

Herr Professor **Dr.-Ing. h. c. Fritz Emde,** Techn. Hochschule, Stuttgart;

Biologie (Allgemeine Biologie der Tiere und Pflanzen, Biophysik, Biochemie, Immunitätsforschung, Pharmakodynamik, Chemotherapie):

Herr Professor **Dr. phil. et med. Carl Oppenheimer,** Berlin-Grunewald.

VERFLÜSSIGUNG DER KOHLE

UND

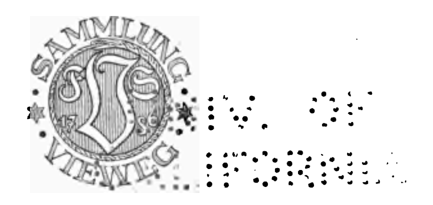
HERSTELLUNG DER SONNENTEMPERATUR

VON

DR. O. LUMMER

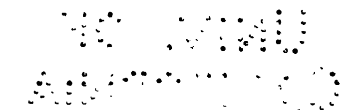
O. Ö. PROFESSOR UND DIREKTOR DES PHYSIKALISCHEN INSTITUTS
DER UNIVERSITÄT BRESLAU

MIT 50 ABBILDUNGEN



DRUCK UND VERLAG VON FRIEDR. VIEWEG & SOHN

BRAUNSCHWEIG 1914



SEINER DURCHLAUCHT

DEM REGIERENDEN FÜRSTEN REUSS J. L.

HEINRICH XXVII.

IN EHRFURCHT GEWIDMET

VON

OTTO LUMMER

VORWORT.

Wenn das Vorwort nach Inhalt und Form von dem üblichen Schema eines solchen ein wenig abweicht, so ist der Grund in dem ungewöhnlichen Zustandekommen dieser Broschüre zu suchen.

Die etwas voreilige Berichterstattung von nicht fachmännischer Seite über zwei von mir gehaltene Vorträge[1]) und vor allem die in den Tageszeitungen daran geknüpften übertriebenen und zum Teil direkt phantastischen Kommentare waren geeignet, mich in den Augen der wissenschaftlichen Welt in ein ganz schiefes Licht zu setzen. Außerdem wurde die Aufmerksamkeit der Öffentlichkeit sehr gegen meinen Wunsch in reklamehafter Weise auf Untersuchungen gerichtet, die sich noch im Versuchsstadium befanden. Ich fühle mich deshalb verpflichtet, so schnell als möglich ausführlich über meine Versuche zu berichten, obwohl sie zum Teil auch heute noch nicht abgeschlossen sind. Auch bin ich gezwungen, für meinen Bericht die Form einer Broschüre zu wählen, um ihn den weitesten Kreisen zugänglich zu machen, die nun doch einmal mit dieser Angelegenheit befaßt worden sind.

Meinen zweiten Vortrag schloß ich nach der Darlegung meines gesamten damaligen Beobachtungsmaterials und nachdem ich den leichtflüssigen Zustand des Bogenlampenkraters bei verringertem Druck (etwa $^1/_2$ Atm.) demonstriert hatte mit den freilich etwas kühnen Worten:

> „Ehe ich nicht durch anderweitige Versuche widerlegt worden bin, muß ich es als erwiesen betrachten, daß wir es bei meinen Versuchen mit dem flüssigen Zustand des reinen Kohlenstoffs zu tun haben."

---

[1]) I. „Über die Verdampfungstemperatur der Bogenlampenkohle", vorgetragen am 5. Mai 1913 in der Leipziger Sitzung der „Deutschen Beleuchtungstechnischen Gesellschaft". — II. „Über den flüssigen Zustand der Kohle", vorgetragen in der Sitzung der Naturwissensch. Sektion der „Schles. Ges. f. Vaterländische Kultur" am 26. Nov. 1913.

In der recht lebhaften und ausführlichen Diskussion wurde diese Schlußfolgerung stark angezweifelt. Zunächst wurde die Flüssigkeit auf dem positiven Krater überhaupt nicht als solche anerkannt. Die Flüssigkeit werde durch „schaumartige Vorgänge“ nur vorgetäuscht. Die weithin sichtbar gewesenen, in der Flüssigkeit sich lebhaft tummelnden, heller als diese leuchtenden und nach meiner Ansicht festen Körperchen („Fische“, § 20) wurden als „Schaumbläschen“ gedeutet. Schwerwiegender als diese und andere Einwände war für mich der folgende:

Von fundamentaler Bedeutung für meine Schlußfolgerung war mir die Frage, ob das Erstarrungsprodukt der Schmelze bei allen untersuchten Kohlen wirklich Graphit sei. Ich hatte diese Frage bejaht. Dagegen wurde vor allem eingewendet, daß sich Graphit bei Erhitzung des Kohlenstoffs auch bilde, ohne daß dieser erst durch die flüssige Phase gegangen sei und daß das Erstarrungsprodukt der Schmelze erst dann als „Graphit“ anzusprechen sei, wenn es nicht nur dem Aussehen usw. nach, sondern auf Grund einer exakten chemischen Analyse als Graphit identifiziert worden sei. Diese Analyse war, weil ich sie nach meinem Befunde nicht mehr für notwendig hielt — die später ausgeführten Analysen gaben mir übrigens vollkommen recht —, leider nicht ausgeführt worden, und so schien mein Hauptargument erschüttert — wenigstens in den Augen der dem Vortrage beiwohnenden Wissenschaftler.

Da ich außerdem nur über vorläufige Resultate berichtet hatte, so hatte ich keine Veranlassung, den folgenden zusammenfassenden Schlußworten des Vorsitzenden zu widersprechen: „Ich glaube kaum, daß durch weitere Diskussion die Frage geklärt werden kann, ob wir es bei den wunderschönen Versuchen des Vortragenden mit dem flüssigen Zustand des reinen Kohlenstoffs zu tun haben. Erst weitere Versuche müssen angestellt werden, ehe diese wichtige Frage entschieden werden kann. Jedenfalls danke ich usw.“

Damit schien mir alles in schönster Ordnung: Ich hatte meine Resultate einem engeren Kreis von Fachgenossen zur Diskussion vorgelegt und aus dieser Anregungen zu weiteren Versuchen geschöpft. Die Öffentlichkeit ging die ganze Sache jedenfalls vorläufig nichts an.

Der laienhafte Berichterstatter hatte aber einen anderen Schluß gezogen, denn er hatte meine vorläufige Schlußfolgerung

als fait accompli noch am gleichen Abend dem Wolff-Bureau in Berlin telegraphisch übermittelt.

Schon am nächsten Morgen brachten alle großen Berliner Blätter in teilweise sensationeller Form die Nachricht, daß mir die „große Entdeckung“ gelungen sei, den Kohlenstoff zum Schmelzen zu bringen, womit wieder einmal ein bisher für unlösbar gehaltenes Problem gelöst sei. In der Tat galt bis dahin der Ausspruch Moissans (§ 3), daß der Kohlenstoff unschmelzbar sei oder höchstens bei sehr hohen Drucken in flüssiger Form existieren könne, als eine Art Glaubenssatz, als Axiom. Demgemäß kehrt in den neuesten Schriften über den Kohlenstoff der Satz immer wieder, daß der Kohlenstoff unschmelzbar ist.

Kommentare von Berufenen und Unberufenen knüpften an die ersten Zeitungsberichte die weittragendsten Ausblicke und Hoffnungen; die Herstellung künstlicher Diamanten war nur noch eine Frage der Zeit. Während so in der Presse die „Entdeckung“ verherrlicht und die Welt mit mehr oder weniger ähnlichen Bildern des Verfassers beglückt wurde, suchten andererseits Kollegen und Freunde mich in der entschiedensten Weise davon zu überzeugen, daß ich sicher keinen reinen Kohlenstoff geschmolzen habe.

So tief wurzelte der Autoritätsglaube und damit die Überzeugung von der Unschmelzbarkeit des reinen Kohlenstoffs bei gewöhnlichen Drucken.

Dann erschienen die Berichte und Kommentare der ausländischen Presse, in denen von der Herstellung künstlicher Diamanten und merkwürdigerweise meist von meinen Versuchen über die Verwirklichung der Sonnentemperatur die Rede war[1]), obgleich ich bisher noch nichts über diese Versuche publiziert habe oder auch nur ein Wort darüber im „Kohlevortrag“ gesagt hatte. Woher kam die Verknüpfung der flüssigen Kohle mit dem künstlichen Sonnenlicht bzw. der Verwirklichung der Sonnentemperatur?

---

[1]) So erschien ein langes Interview in einem großen Pariser Journal unter der fettgedruckten Überschrift: „Un alchymist d'outre Vosgues. Professeur Berthelot est sceptique“, in welchem ich gegen die „Utopie“ Diamanten zu machen, in Schutz genommen werde, von der flüssigen Kohle kaum die Rede ist, wohl aber ausführlich erläutert wird, daß die „wohlbekannten Versuche Lummers bei hohem Druck mit der Bogenlampe darauf hinauszielen, die Sonnentemperatur (6000^0) zu verwirklichen“.

Woher rührte die Kenntnis von Versuchen, deren vorläufige Ergebnisse ich in dieser Broschüre zum ersten Male publiziere? Wiederum war auch hier ein enthusiasmierter „Berichterstatter“, diesmal aber ein anderer, die Ursache.

In der erwähnten am 5. Mai 1913 in Leipzig abgehaltenen Sitzung der „Deutschen Beleuchtungstechnischen Gesellschaft“ berichtete ich über meine ebenfalls erst in dieser Broschüre publizierten Versuche über die Verdampfungstemperatur der Kohle in der Bogenlampe. Deren Resultate gipfelten in dem Nachweis, daß die Temperatur der in freier Luft brennenden Bogenlampe unabhängig von der Strombelastung sei, und daß ferner diese Temperatur mit Abnahme des Druckes ebenfalls abnimmt. Im Anschluß daran hatte ich einige „Ausblicke in die Zukunft“ gegeben, unter anderem die problematische, damals aber experimentell noch nicht erwiesene These ausgesprochen: „Wenn diese Verdampfungstemperatur mit zunehmendem Druck in analoger Weise zunehmen sollte, wie sie nach den mitgeteilten Versuchsergebnissen bei abnehmendem Druck abnimmt, dann würde man höhere Temperaturen als bisher (3700° abs.) erreichen und dürfte hoffen, vielleicht sogar die Sonnentemperatur (6000°) zu verwirklichen.“ Auch stellte ich als möglich hin, daß man mit Bogenlampen, die unter hohem Druck zum Brennen gebracht werden, vielleicht eine bessere Ökonomie erzielen dürfte, als mit den bisherigen Bogenlampen. Soweit ich weiß, hat niemand in diesem wissenschaftlich-technischen Kreise diese hypothetischen „Ausblicke“ anders aufgefaßt, als sie von mir gemeint waren, nämlich höchstens als noch zu untersuchende Probleme der Zukunft.

Anders aber spiegelte sich das Zukunftsbild in einem bald darauf erschienenen Zeitungsartikel wieder, der den vielversprechenden Titel trug: „Über das elektrische Licht der Zukunft“ und der natürlich ebenfalls die Runde durch alle Blätter machte und noch in neuester Zeit in ernsthaften populären Zeitschriften spukt [1]). Unter Verkennung des Sachverhaltes wird in diesen

---

[1]) „Im Prometheus“ vom 7. März 1914 steht folgendes: Sprechsaal. „Zu dem Referat »Bogenlampen, die unter hohem Druck brennen« in Nr. 1258 des »Prometheus«, das sich auf neuere Arbeiten von Prof. Lummer bezieht, seien mir einige Bemerkungen zu machen gestattet. Zunächst ist die Angabe der Fußnote, daß die Lichtausbeute, d. i. die Helligkeit, mit der 4. Potenz der absoluten Temperatur wachse, wohl einer Verwechslung zuzu-

Berichten von einer beträchtlichen Ökonomiesteigerung der unter hohem Druck gebrannten Bogenlampe gesprochen, als ob durch den Nachweis der Temperatursteigerung des Bogenlampenkraters mit Erhöhung des Druckes auch schon der Nachweis erbracht wäre, daß dadurch notwendig auch die Ökonomie gesteigert werden müsse.

Leider habe ich bisher nur die Prämisse bewahrheiten können (Steigerung der Temperatur mit steigendem Druck), auf welcher jene Spekulationen aufbauten. Ich bitte daher um Verzeihung, wenn ich nicht alle Versprechungen halte, welche die Tagesblätter für mich abgegeben haben.

Nachdem nun die flüssige Kohle immer weitere Kreise gezogen hatte, sich auch die Witzblätter in humorvoller Weise der „Entdeckung“ bemächtigt hatten und als gar die Gefahr drohte, daß auch die Diamantindustrie in Mitleidenschaft gezogen wurde, glaubte ich aus meiner bisherigen Reserve heraustreten zu müssen. Am vierten Tage nach meinem Vortrage sandte ich daher eine „aufklärende“ Mitteilung an das Wolff-Bureau und einige führende Blätter in Berlin. Der Wortlaut dieses Telegramms ist aus dem Abdruck in der „Täglichen Rundschau“ vom 30. November zu ersehen:

„Flüssiger Kohlenstoff. Prof. Dr. Otto Lummer teilt uns auf dem Drahtwege folgendes mit: Um den teils unrichtigen und teils direkt phantastischen Zeitungsnachrichten über meine in der naturwissenschaftlichen Sektion der »Schlesischen Gesellschaft für vaterländische Kultur« zur Erörterung gestellten Beobachtungsergebnisse ein Ende zu bereiten, teile ich folgendes mit: »Das Resultat steht, wie ich selbst betont und die Diskussion der Chemiker bekräftigt hat, insofern noch nicht durchaus fest, als es noch langwieriger Versuche mit Kohlenstoff in seiner allerreinsten Form, auch als Diamant, bedarf, um die Existenz des Kohlenstoffs in flüssigem Zustande endgültig zu erweisen. Ein Weg zur Erreichung dieses Zieles ist auch in bezug auf den Diamanten durch meine Versuche gegeben. Jeder Fachmann,

---

schreiben.“ Dann wird berichtet, daß nach Lummer-Kurlbaum beim weißglühenden Platin die Helligkeit noch zur 14. Potenz der absoluten Temperatur fortschreite und daß dies auch für Kohle gelten dürfte. Wenn außerdem die Verdampfungstemperatur der Kohle mit dem Druck steige und es möglich wäre, diese dadurch von 4000° auf 5000° zu erhöhen, so „müßte diese Erhöhung von 4000° auf 5000° nach der obigen Formel eine 14,6fache Helligkeit bewirken, was nichts anderes besagen würde, als daß eine Lampe von 5000° 14,6 Lampen von 4000° ersetzen könnte.“ O si tacuisses, philosophus mansisses!

der dem Vortrag und der gründlichen Diskussion beigewohnt hat, weiß alles dies und damit auch, daß die Laienwelt ganz unnütz in Aufregung versetzt worden ist.«"

Die Diamantaktien sollen daraufhin prompt wieder zur ursprünglichen Höhe gestiegen sein und ich hoffe, daß durch die Verflüssigung der Kohle niemand Schaden erlitten hat außer mir, mindestens an Gesundheit und — hoffentlich nur vorübergehend — an wissenschaftlichem Ansehen! Inzwischen arbeitete ich Tag und Nacht um baldmöglichst jene Lücken auszufüllen, welche die Kette meiner Beweise zur Zeit des Vortrages noch aufwies.

Um den zahlreichen während dieser Zeit fortdauernd einlaufenden Anfragen nach dem neuesten Stand meiner Schmelzversuche gerecht zu werden, und nachdem inzwischen auf Grund der neuen Versuche sich auch meine Freunde und Kollegen bekehrt hatten, sandte ich nach Abschluß meiner Versuche eine zweite Mitteilung an das Wolff-Bureau ab, dessen Wortlaut aus der folgenden in allen Blättern gleichlautend wiedergegebenen Zeitungsnotiz zu ersehen ist:

„Berlin, 2. Januar. Über den Fortschritt der Forschungen des Prof. Dr. Lummer zur Verflüssigung der Kohle und des Diamanten erhält das Wolffsche Telegraphenbureau folgende authentische Mitteilungen: Das gesamte Beobachtungsmaterial wird in einer Broschüre publiziert, die in etwa acht Wochen erscheinen wird. Diese Broschüre wird enthalten: Die Versuchsbedingungen, die Analyse der benutzten Kohlensorten, die Analyse des Erstarrungsproduktes (reiner Graphit), die Bestimmung des Schmelzpunktes der verschiedensten Kohlen und des reinen Diamanten, die Unabhängigkeit der Schmelztemperatur vom Druck und der Art des Gases (Luft, Stickstoff, Kohlendioxyd), verschiedene Momentaufnahmen der flüssigen Kohlenoberfläche und des Diamanten, die deutlich erkennen lassen, daß in der flüssigen Schicht feste eckige Körperchen in lebhafter Bewegung sind. Die Breslauer Physiker und Chemiker beider Hochschulen sind jetzt einig darüber, daß sie es bei den Versuchen von Lummer mit dem flüssigen Zustande des reinen Kohlenstoffs zu tun haben. Gleichwohl möchte Prof. Lummer auch diesmal wieder wie in seiner ersten Notiz betonen, daß seine Resultate wenigstens vorläufig weder für die Technik noch für die Industrie irgend welche praktische Bedeutung beanspruchen können. Die Broschüre kommt bei Friedr. Vieweg & Sohn in Braunschweig heraus."

Nachdem auch alle weiteren bis heute angestellten Versuche meine frühere Schlußfolgerung vollauf bestätigt haben, übergebe ich hiermit mein gesamtes Beobachtungsmaterial der breiten Öffentlichkeit zur Beurteilung. Außer den eingangs erwähnten Gründen schien mir die Form einer Broschüre schon deshalb

geboten, weil das mitzuteilende Material weit über den Rahmen einer wissenschaftlichen Abhandlung hinausgewachsen ist, zumal ich gleichzeitig nicht nur über die flüssige Kohle, sondern auch über die bisherigen Versuche zur Verwirklichung der „Sonnentemperatur“ glaubte berichten zu müssen. Die Aufnahme dieser Versuche bei hohen Drucken (bis 26 Atm.) erheischte ihrerseits die Anstellung neuer Versuche über die Strahlungseigenschaften der Kohle und das Eingehen auf die Bestimmung der wahren Temperatur der glühenden Kohlenfäden in Glühlampen, welche mir im Laufe des vorigen Sommers gelungen war. Dadurch dürfte auch die Verzögerung im Erscheinen dieser Broschüre entschuldbar sein.

Das gesamte Beobachtungsmaterial ist ausführlich im Kapitel II dargelegt worden.

Außerdem glaubte ich einen Bericht über die Arbeiten früherer Forscher geben zu sollen, soweit sich diese mit dem Schmelzen und Verdampfen der Kohle beschäftigt haben, und soweit deren Resultate für die von mir angestellten Untersuchungen in Betracht kommen. In diesem „historischen“ Teil (Kap. I) wird auch die Entwickelung unserer heutigen Kenntnis vom Wesen des Kohlenstoffs in seinen drei bisher bekannten allotropen Modifikationen gegeben, da wir im sachlichen Teil (Kap. II) mehrfach vom Wesen und den Eigenschaften der drei Modifikationen Gebrauch machen. Dabei ließ es sich nicht vermeiden, auch solche Versuche zu streifen, welche sich mit der Herstellung künstlicher Diamanten beschäftigt haben. Hat doch fast ohne Ausnahme jeder, der sich mit dem Schmelzen oder Verdampfen des Kohlenstoffs beschäftigt hat, versucht, auch den Diamanten künstlich zu erzeugen. Dem Ausspruch von Le Chatelier[1]): „Die künstliche Herstellung des Diamanten ist für den modernen Chemiker ein Problem, wie die Suche nach dem Stein der Weisen für die Alchymisten“, habe ich nichts hinzuzufügen.

Zum Schluß sei mir gestattet, auch an dieser Stelle allen denen bestens zu danken, welche mich bei meinen Versuchen gütigst mit Rat und Tat unterstützt haben. Mein Dank gebührt Herrn Professor Stock für die Ausführung der chemischen Analyse des Erstarrungsproduktes (§ 27), Herrn Professor Beutell für die Bestimmung des spezifischen Gewichtes mehrerer Erstarrungs-

[1]) Henri Le Chatelier: „Vom Kohlenstoff“, übersetzt von H. Barschall, mit einem Vorwort von F. Haber. Halle, Wilhelm Knapp, 1913.

produkte (ebenda), Herrn Professor Julius Meyer für gasanalytische Untersuchungen. Mein Dank gebührt ganz besonders den „Planiawerken“ in Ratibor, welche mir in aufopfernder und liebenswürdiger Weise immer reinere Kohlensorten herstellen und analysieren ließen und mich auch in pekuniärer Beziehung bei meinen Druckversuchen unterstützt haben. Ebenso möchte ich der Firma „Breslauer Diamant-Ziehstein-Fabrik“ und ihrem Mitinhaber, Herrn Diener, für die kostenlose Überlassung klarer brasilianischer Diamanten danken. Wenn auch die von der Firma Lange, Lorcke & Co. in Brieg extra angefertigten Stahlstäbe mit eingeschmolzenen Diamanten zu keinem positiven Resultate führten, so gebührt ihr meinerseits gleichwohl Dank.

Herrn Professor Waetzmann möchte ich herzlich danken für seine oft ausgeführten Kontrollbeobachtungen und die freundschaftliche Art, in welcher er die Versuchsergebnisse mit mir diskutiert und kritisch beleuchtet hat. Auch danke ich ihm für die guten Ratschläge beim Lesen der Korrektur. Herrn Dr. Höhne bin ich zu Dank verpflichtet für die unermüdliche und tatkräftige Mitarbeit bei Ausführung der Versuche, bei Ausrechnung der Beobachtungen, bei Anfertigung der Skizzen, Kurven und photographischen Aufnahmen. Ebenso möchte ich Herrn Lorenz danken für die Ausführung der zahlreichen Analysen der Kohlen auf Aschengehalt, sowie für seine außergewöhnliche und erfolgreiche Mitarbeit bei den neueren Versuchen. Für mancherlei Hilfeleistung gebührt auch Herrn Teuchert mein Dank.

Meinem Freunde E. Pringsheim, welcher meinen Versuchen stets großes Interesse entgegenbrachte, bin ich für seine kritische Durchsicht meines Manuskriptes und die dabei und beim Lesen der Korrektur erteilten Ratschläge zu großem Dank verpflichtet. Last not least der Verlagsbuchhandlung, welche keine Mühe gescheut hat, die Figuren in so vorzüglicher Weise herzustellen. Freilich geben die Reproduktionen der Momentaufnahmen des flüssigen Kraters trotz ihrer ganz vorzüglichen Ausführung nur eine schwache Vorstellung von der Lebendigkeit und der originellen Schönheit des wirklichen Schmelzphänomens, welches nach dem Ausspruch vieler, die es gesehen haben, als „Kunst in der Natur“ zu bezeichnen ist.

Breslau, 29. Juni 1914.

Otto Lummer.

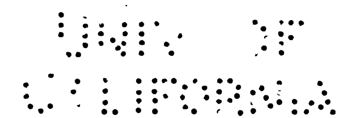
INHALT.

Berichtigungen und Ergänzungen.

S. 10, Z. 12 v. o.	muß es heißen	„Siliciumcarbid“ statt „Siliciumkohlenstoff“.
S. 12, Z. 12 v. o.	„ „ „	„Carbide“ statt „Karbüre“.
S. 42, Z. 11 v. o.	„ „ „	„0,000 153“ statt „0,000 158“.
S. 81, Z. 15 v. o.	„ „ „	„Nr. d“ statt „Nr. b“.
S. 87, Fußnote Z. 1	„ „ „	„Direktionsmitglied“ statt „Chefchemiker“.
S. 87, „ Z. 2	„ „ „	„je ein Kohlenpaar“ statt „jedes Kohlenpaar“.

Beziehung zwischen Flächenhelligkeit und Temperatur der Kohle.

Aus meinen eigenen Versuchen für Glühlampenkohle habe ich in der Beziehung 7, S. 50 die Potenz $x = 8{,}5$ extrapoliert und diesen Wert zur Berechnung der Temperaturen aus den zugehörigen Flächenhelligkeiten zugrunde gelegt (vgl. S. 126). Da die Bogenlampenkohle wenigstens im Sichtbaren wie ein grauer Körper strahlt, so dürfte für x auch derjenige Wert genommen werden, welchen man für den schwarzen Körper abgeleitet hat (vgl. Eisler, E. T. Z. **25**, 188 und 443; ebenso Jablonski, E. T. Z. **25**, 374, 1904), zumal diese Beziehung nahezu für alle Temperaturstrahler gelten dürfte, da sie sogar die Platinversuche von Lummer-Kurlbaum (vgl. S. 50) wiedergibt. Gemäß dieser strahlungstheoretischen Beziehung nimmt x von 30 bei 1200° ziemlich schnell bis $x = 13$ bei 2000° und dann weniger schnell bis $x = 9$ bei 3000°, $x = 7$ bei 4000° bis $x = 5$ bei 5000° abs. ab. Mit zunehmender Temperatur nimmt x noch weiter, wenn auch asymptotisch, ab. Die Übereinstimmung des „schwarzen“ Wertes $x = 9$ bei 3000° abs. mit meinem „Kohlenwert“ $x = 8{,}5$ bei 2900° abs. ist wohl ein Zeichen dafür, daß der Kohle mit großer Wahrscheinlichkeit die gleichen x-Werte zukommen dürften wie dem schwarzen Körper. Danach wäre ich berechtigt, bei der Umrechnung der experimentell gefundenen Flächenhelligkeiten (Kurve BD in Fig. 49) in Temperaturen jedenfalls $x < 8{,}5$ zu nehmen, und zwar bei den größten erzielten Flächenhelligkeiten der Kurve BD (18fach bei 22 Atm.) mindestens den Wert $x = 5$. Unter Benutzung dieses Wertes entspricht der 18fachen Flächenhelligkeit aber die Temperatur von rund 7500° abs.



Kapitel I.

Historisches.

(Frühere Untersuchungen über das Wesen des Kohlenstoffs, seine Verdampfung und Verflüssigung.)

§ 1.

Vom Kohlenstoff und seinen drei allotropen Modifikationen.

Obwohl uns in erster Linie nur diejenigen Arbeiten interessieren, welche die Verflüssigung des Kohlenstoffs zum Ziele haben, müssen wir doch auch die Untersuchungen kurz besprechen, welche vom Wesen des Kohlenstoffs in seinen drei Modifikationen („amorpher" Kohlenstoff, Graphit und Diamant) handeln, da wir im sachlichen Teile (Kap. II) mit der Definition dieser Modifikationen und ihren Eigenschaften vertraut sein müssen. Wie schon im Vorwort erwähnt, müssen wir gelegentlich auch auf die Bestrebungen zur Herstellung künstlicher Diamanten eingehen, da die meisten Forscher, die sich mit der Verdampfung oder Verflüssigung des Kohlenstoffs ernstlich beschäftigt haben, auch Versuche zur Gewinnung künstlicher Diamanten ausführten und behaupteten, solche auch wirklich erhalten zu haben. Der Wunsch, künstliche Diamanten herzustellen, ist wohl auch das Leitmotiv für die älteren Versuche gewesen, welche das Wesen des Diamanten aufzuklären versuchten.

1. *Das Wesen des Diamanten.* Heute wissen wir, daß auch der Diamant Kohlenstoff ist. Freilich hat es lange gedauert, bis der Diamant, der schon im grauen Altertum als Edelstein am höchsten gewertet wurde, als kristallisierter *Kohlenstoff* erkannt wurde. Noch heute widersprechen sich die Anschauungen darüber, ob es Diamanten ohne Verunreinigungen, d. h. *absolut reine* Diamanten gibt.

Zum ersten Male soll Boyle[1]) im Jahre 1675 beim Erhitzen von Diamanten Dämpfe haben aufsteigen sehen. Im Jahre 1694 wurden unter der Ägide des Großherzogs von Toscana an der Accademia del Cimento Diamanten und Rubine im Werte von 6000 Gulden 24 Stunden lang dem heftigsten Feuer ausgesetzt. Während Rubine usw. unverändert geblieben waren, sollen die Diamanten sämtlich und vollständig verschwunden gewesen sein! Waren sie wirklich verbrannt? Zum gleichen Resultate führten spätere auf Veranlassung Kaiser Franz' I. angestellte Versuche, bei welchen durch Hohlspiegel konzentrierte Sonnenstrahlung auf den Diamanten einwirkte.

Erst Newton stellte auf Grund von Untersuchungen über die Brechbarkeit usw. aus Analogiegründen die wissenschaftliche Hypothese auf, daß der Diamant wie Kohle brennbar sein müsse. Der erste, welcher diese Frage durch geeignete Versuche zu entscheiden suchte, war Darcet[2]), welcher Diamanten in offenen und geschlossenen Gefäßen erhitzte. In ähnlicher Richtung experimentierte Lavoisier, welcher seine berühmt gewordenen Arbeiten folgendermaßen schließt: „Man hätte nicht vermuten können, daß man auch nur einige Ähnlichkeit zwischen Kohle und Diamant finden würde, und sicher wäre es unvernünftig, diese Analogie zu weit zu treiben, da sie nur insoweit existiert, als beide Körper in die Klasse der brennbaren Körper eingereiht werden zu müssen scheinen, und daß sie von dieser Klasse die am wenigstens brennbaren sind. Der Leser wird nicht verfehlen zu fragen, was denn eigentlich der Diamant sei. Ich gestehe, daß diese Frage noch immer nicht befriedigend zu beantworten ist und vielleicht nie beantwortet werden wird. Indessen nach meiner Kenntnis scheint ungefähr folgendes bewiesen zu sein: 1. daß der Diamant ein verbrennbarer Körper ist; 2. daß er bei genügend hoher Temperatur in Luft verdampft und sich bei der Verbrennung in Sauerstoff in ein Gas verwandelt, welches viel Ähnlichkeit hat mit dem bei Gärungen usw. sich entwickelnden Gas."

---

[1]) M. E. Boutan, „Le Diamant" Paris, Vve Chr. Dunod, Editeur, Paris 1886. Diesem ausgezeichneten Werk sind die älteren historischen Notizen über den Diamanten entnommen.

[2]) Darcet, „Mémoire sur le diamant et quelques autres pierres précieuses traitées au feu." Paris 1771.

Daß dieses Gas tatsächlich Kohlensäure ist, beweist Tennant im Jahre 1797, welcher zugleich zeigt, daß die dem Diamanten an Gewicht gleiche Kohlenmenge auch die gleiche Gasmenge erzeugt. Letzteres wird von Davy, dem Entdecker des Flammenbogens (1816), bestätigt, welcher auch konstatiert, daß der Diamant beim Verbrennen keine Spur von Wasserdampf entwickelt, daß also im Diamanten kein Wasserstoff enthalten sein kann.

Endgültig ist die vielumstrittene Frage, ob der Diamant reiner kristallisierter Kohlenstoff sei, erst durch die ausgezeichneten Arbeiten von Dumas und Stas (1841) entschieden und zwar in bejahendem Sinne beantwortet worden. Diese Experimentatoren bestimmten auch den Aschenrückstand unreiner Diamanten. Dabei fanden sie einen Aschengehalt[1]) von 0,05 bis 0,2 Proz. Roscoe und Friedel und teilweise letzterer allein wiederholten diese Versuche und fanden, daß auch die reinsten Diamanten beim Verbrennen einen Rückstand hinterlassen. Der Aschengehalt betrug 0,05 bis 0,15 Proz.

Zusammenfassend schreibt in bezug auf diese Frage Le Chatelier in seinem weiter oben zitierten Werk „Vom Kohlenstoff" folgendes: „Die Diamanten sind nie ganz rein; sie geben immer nach der Verbrennung einen geringen Aschenrückstand. In den reinsten und durchsichtigsten Diamanten beträgt der Aschenrückstand nur 0,1 bis 0,2 Proz.; er steigt mit dem Grad der Färbung der Diamanten. Man findet nach der Verbrennung die Verunreinigungen (SiO_2, F_2O_3, CaO) als Oxyde vor; damit ist aber nicht gesagt, daß sie sich ursprünglich in demselben Zustande im Diamanten befanden."

Es muß dabei offen gelassen werden, ob nicht auch die „reinsten" Diamanten ultramikroskopisch kleine „Einschlüsse" enthalten, welche den Aschenrückstand beim Verbrennen liefern[2]).

[1]) Dumas u. Stas (Ann. de Chim. et de Phys., 3e série, t. I, 1841, p. 6—48) schreiben: „Das Residuum oder „Asche", wenn man es so nennen darf, besteht bald in strohgelben und kristallinischen Teilchen usw. Diese mineralischen Substanzen gehören dem Kristall selbst an. Sie sind zwischen seine eigenen Blätter im Moment der Bildung eingeschlossen worden usw."

[2]) In dem im Jahre 1909 erschienenen Werk „Edelsteinkunde" von Max Bauer ist S. 141 in bezug hierauf folgendes zu lesen: „Wird ein Diamant vollständig verbrannt, so daß die Gesamtmenge seines Kohlenstoffs in Kohlensäure übergeführt ist, so bleibt nicht der geringste Rückstand, wenn er vollkommen farblos und klar gewesen ist." ... „Die Aschenbestandteile der Diamanten bestehen also aus Beimengungen von äußerst minimaler Größe, die in sehr

Diese Tatsachen und Hypothesen über die Reinheit glasklarer Diamanten sind insofern von Interesse für uns, als wir das Schmelzphänomen an „glasklaren“ Diamanten (§ 23) in gewisser Beziehung mit als Beweis dafür heranziehen, daß wir es beim analogen Schmelzphänomen der Kohle mit flüssigem reinen Kohlenstoff zu tun haben. Im übrigen kann uns die Definition des Diamanten, die in exakter Weise zuerst von Moissan gegeben ist, gleichgültig lassen, da wir uns mit der Herstellung künstlicher Diamanten nicht beschäftigen. Übrigens bezweifelt auch Le Chatelier, daß Moissan wirkliche, wenn auch nur mikroskopisch kleine Diamanten künstlich hergestellt hat (a. a. O., S. 18).

II. Graphit. Wichtig für uns ist, das Wesen, die Eigenschaften und die Definition des Graphits kennen zu lernen, da wir aus der Tatsache, daß die Schmelze auf dem positiven Krater der Bogenlampe beim Erstarren Graphit liefert, auf die Reinheit der geschmolzenen Kohle schließen und daraufhin behaupten, daß wir es mit geschmolzenem reinen Kohlenstoff zu tun haben. Die genaue Definition des Graphits hat zuerst Berthelot[1]) gegeben: „Toute variété de carbone, susceptible de fournir par oxydation un oxyde graphitique.“ Dieses Graphitoxyd wird nach Brodies Verfahren erhalten, indem man den Graphit der Hitze aussetzt und der oxydierenden Wirkung eines Gemisches aus Kaliumchlorat und Salpetersäure.

Die genaueste Untersuchung aller natürlichen und künstlichen Graphitsorten verdanken wir Moissan. Dieser sagt zum Schluß seiner diesbezüglichen Untersuchungen[2]): „Gemäß der Definition Berthelots geben wir den Namen »Graphit« derjenigen meist kristallisierten Kohlenart, deren Dichte etwa 2,2 ist, und welche bei Einwirkung von Kaliumchlorat und (rauchender) Salpetersäure leicht zu charakterisierendes Graphitoxyd liefert.“

feiner Verteilung durch die Masse zerstreut sind, so daß sie auch bei der stärksten Vergrößerung vielfach nicht einzeln beobachtet werden können. Nicht immer sind aber diese fremden Körperchen, die der Diamant als Wirt beherbergt, so klein; häufig sind sie umfangreich genug, daß sie mit der Lupe oder sogar schon mit bloßem Auge deutlich zu sehen sind. Sie bilden dann das, was man als die Einschlüsse des Diamants bezeichnet. Es sind einzelne scharf umgrenzte Körner, Splitter, Schuppen usw.“

[1]) Berthelot, Recherches sur les états du carbone. Ann. de Chimie et de Phys., 4e série, t. XIX, p. 392—427 (1870).

[2]) Siehe die Literaturangabe im § 3 dieses Kapitels.

In bezug auf die sonstigen Eigenschaften des Graphits schreibt Le Chatelier[1]): „Der Graphit kommt in blätterigen Stücken von hexagonalem Aussehen vor, deren Flächen im allgemeinen schlecht ausgebildet sind. Nach den Angaben von Nordenskjöld ist der Graphit nicht hexagonal, wie man früher annahm, sondern monoklin mit hexagonaler Pseudosymmetrie. Die Winkelgröße ist gleich 124,33° und nicht gleich 120° wie beim regelmäßigen Sechseck. Der Graphit ist leicht spaltbar und liefert beim Zerreiben sehr dünne Blättchen. Auf der blätterigen Struktur beruht ebenfalls die Plastizität des Graphits, welche der des Tones ähnlich ist.“ Die Plastizität der Graphitkristalle werden wir für die Deutung des Wesens der helleren, im Kohlenteich sich tummelnden, festen Individuen, der „Fische“ (§ 19), im Auge zu behalten haben.

Bei Besprechung der künstlichen Herstellung des Graphits (durch Glühen der amorphen Kohle oder des Diamanten) erwähnt Le Chatelier noch eine uns interessierende Tatsache: „Wenn man (beim »Acheson-Verfahren« zur Gewinnung des Graphits im großen) die Erhitzung genügend hochtreibt, wird die gesamte Kohle in Graphit verwandelt, und gleichzeitig werden alle Aschenbestandteile verflüchtigt, so daß der erzeugte Graphit sehr rein ist und höchstens einige Tausendstel Asche enthält, d. h. hundertmal weniger als das Ausgangsprodukt.“ Wir werden in § 26 etwas Analoges in bezug auf die Reinigung der Kohlenstäbe bei deren Benutzung als Bogenlampenkohlen durch das Glühen im Flammenbogen kennen lernen.

III. Amorpher Kohlenstoff. In bezug auf diesen schreibt Le Chatelier (a. a. O.): „Die sogenannte amorphe Kohle ist nicht in kristallisiertem Zustand bekannt; es besteht indessen kein Grund zu der Annahme, daß sie in Wahrheit amorph ist.“ Wirklich amorph sind nur Stoffe, in denen alle physikalischen Eigenschaften unabhängig von der Richtung im Raume sind, „wie das Glas, die Harze usw.“.

„Bei einem undurchsichtigen und oft pulverförmigen Material wie Kohlenstoff haben wir nicht die Möglichkeit, das Bestehen oder das Fehlen einer kristallinischen Orientierung zu ermitteln;

---

[1]) Le Chatelier, a. a. O., S. 41, welchem Werke auch die Beschreibung der Eigenschaften des amorphen Kohlenstoffs zum Teil wörtlich entlehnt ist.

es ist daher unwissenschaftlich und zwecklos, darüber Behauptungen aufzustellen.“

Amorpher Kohlenstoff soll ein spezifisches Gewicht haben, welches nicht unter 1,4 herabgeht und nicht über 1,9 hinaufgeht.

§ 2.

Schmelzversuche von C. Despretz[1]).

Despretz stellt sich die Aufgabe, alle bis zu seiner Zeit als nicht verdampfbar oder als unschmelzbar geltenden Substanzen zu bezwingen, und untersucht die verschiedenen Mittel, möglichst hohe Temperaturen herzustellen. Von diesen wendet er bei seinen letzten und entscheidenden Versuchen nur noch die Joulesche Wärme kräftiger Batterien von Elementen und den Flammenbogen an. Manchmal setzt er die Kohle auch beiden Heizwirkungen aus. Aber schon ehe er sich die leistungsfähigsten Batterien verschafft hatte, „schienen Tropfen von einem stark erhitzten Stäbchen aus Anthracit gefallen zu sein“, und in einem Auffangeschälchen aus Platin fanden sich kleine schwarze Kügelchen vor, „die mit bloßem Auge zu sehen und so schwarz wie Anthracit waren“. Um eine langsame Verdampfung der Kohle zu erzielen, müsse man die Kohlenstäbchen im Stickstoff bei erhöhtem Druck durch Joulesche Wärme erhitzen. Wo immer Despretz erhöhte Drucke verwendet, geht er nicht über 3 Atm. hinaus. Die dem Versuche unterworfenen Kohlensorten waren: 1. Retortenkohle (2 Proz. Aschengehalt). 2. Englischer Graphit (1 Proz. Aschengehalt). 3. Glasiger Anthracit (1,5 Proz. Aschengehalt). 4. Zuckerkohle, erhalten durch Calcination von

---

[1]) Despretz’ Arbeiten: 1. „Fusion et volatilisation des corps réfractaires. Note sur quelques expériences faites avec le triple concours de la pile voltaïque, du soleil et du chalumeau.“ Compt. rend. **28**, 755 (1849). — 2. „Deuxième Note sur la fusion et la volatilisation des corps.“ Ebenda **29**, 48 (1849). — 3. „Troisième Note sur la fusion et volatilisation des corps.“ Ebenda **29**, 545 (1849). — 4. „Quatrième Note sur la fusion et volatilisation des corps.“ Ebenda **29**, 709 (1849). — 5. „Cinquième communication sur la pile. Quelques nouvelles expériences sur le charbon. Longueurs de l’arc voltaïque.“ Ebenda **30**, 367 (1850). — 6. „Observations sur le charbon et sur la différence de la température des pôles lumineux d’induction.“ Ebenda **37**, 369 (1853). — 7. „Addition à la note sur le charbon.“ Lue dans la séance du 5 septembre 1853. Ebenda **37**, 443 (1853).

kristallisiertem weißen Zucker (0,5 Prozent Verunreinigungen). 5. Zuckerkohle, erhalten aus Kandiszucker in schönen ungefärbten Kristallen, „die nur 1,007 Asche geben". 6. Kohlenruß aus gereinigtem Terpentinöl.

Vor Beschreibung einer großen Reihe von Versuchen teilt Despretz das erhaltene Resultat mit, indem er schreibt: „Ich gehe jetzt zur Beschreibung der Versuche über, in denen ich die Kohle gekrümmt, geschweißt und geschmolzen habe".

Das durch die Joulesche Wärme erhitzte Kohlenstäbchen verkrümmt sich oft zu einer S-Form: „Es machte den Eindruck, als ob die Kohle fließen wolle". Als diese Versuche mit noch leistungsfähigeren Batterien (600 Bunsenelemente „großen Formates", in Serien zur Erzielung maximaler Stromstärke geschaltet) wiederholt wurden, trat diese Erscheinung noch prägnanter auf, so daß Despretz und seine Mitarbeiter aus dem Befunde schlossen, „daß die Kohle auf einem Teile als geschmolzen anzusehen war".

Auch gelang es Despretz jetzt, Kohlen zu „löten" bzw. aneinander zu „schweißen": „Zwei in Kontakt befindliche Stäbe von 50 mm Länge und 5 mm Dicke aus Retortenkohle waren derart geschnitten, daß sie sich an ihren Endflächen „vollkommen vereinigten". Beim Erhitzen durch die Joulesche Wärme wurde ein Druck in der Längsrichtung ausgeübt: „Die positive Kohle drang in die negative bis zu einer Tiefe von 5 mm ein, wobei sich letztere spaltete. Im Moment, in welchem man den Apparat demontierte, fand das Zerreißen statt, aber nicht am Vereinigungspunkte. An der positiven Kohle war ein Kohlenstück von gleichem Durchmesser und mindestens 2 mm Länge haften geblieben."

Bei einer großen Anzahl von Versuchen fanden die Hitze des Flammenbogens und gleichzeitig die Joulesche Wärme Verwendung. Dazu wurde der Boden des Schmelztiegels aus Zuckerkohle zu einer Platte ausgearbeitet, die den positiven Pol einer Batterie bildete, und durch die gleichzeitig ein „Joulescher Strom" einer zweiten Batterie geschickt wurde. Den negativen Pol der ersten Batterie bildete ein Kohlenstab, dessen freies Ende von oben her der Innenfläche des Tiegels genähert wurde, bis zwischen dieser und dem Kohlenstab ein Flammenbogen spielte. Im Tiegel befanden sich kleine Stückchen aus Zuckerkohle: „In einem Augenblicke waren die Fragmente aus Zuckerkohle aufgezehrt, der Tiegel auf gekrümmte Stücke reduziert (réduit) und das Ganze in Graphit

verwandelt.“ Als aus Unachtsamkeit die positive Platte mit dem negativen Stab in Berührung kam, waren beide verschweißt: „Die Platte hängt noch immer fest am Stab, obgleich dieser Versuch vor sechs Wochen angestellt worden ist und der Stab gegen die Platte geneigt ist“.

Auch Diamantpulver will Despretz erhalten haben, als er mit Hilfe des Funkeninduktors die Kohle langsam zur Verdampfung brachte. Ich erwähne dies, weil erst nach Publikation dieser „Diamantversuche“ Einwände gegen die Reinheit der von Despretz benutzten Kohlen erhoben worden sind.

Die Entgegnung Despretz' lautet: „Mehrere Mitglieder der Akademie scheinen geglaubt zu haben, daß die von mir benutzte Kohle Unreinheiten enthielt! Ich habe gesagt, daß diese Kohle so rein als möglich war; es ist die gleiche Kohle, von der ich in den fünf Mitteilungen gesprochen habe, welche ich die Ehre hatte, der Akademie über das Schmelzen und Verdampfen der Kohle vorzulegen. Ich habe diese Kohle aus weißem kristallisierten Kandiszucker hergestellt, in welchem Herr Germain Barruel nur kaum erkennbare Spuren fremder Stoffe gefunden hat.“

„Die Kohle, von der wir sprechen, verbrennt sozusagen ohne Rückstand; dasselbe ist der Fall mit den Produkten [1]), auf welche wir die Aufmerksamkeit der Akademie lenken.“

„Ich richtete im Jahre 1849 meine Untersuchungen zum Teil auf die Verflüssigung und Verdampfung der Kohle. Ich durfte mich nicht der Gefahr aussetzen, in den Fehler zu verfallen, den mehrere Physiker in verschiedenen Ländern begangen hatten, Silikate für geschmolzene Kohle zu halten, einen Fehler, den auch ich vielleicht begangen hätte, wenn ich der erste gewesen wäre, der versuchte, die Kohle zum Schmelzen zu bringen.“

„Die Retortenkohle, die verschiedenen Graphite, selbst der reinste englische Graphit, die Anthracite, die Holzkohle, hinterlassen immer als Rückstand glasige Kugeln, gefärbte oder ungefärbte, wenn sie in Luft dem Flammenbogen, dem Brennpunkt einer starken Linse oder der Wirkung des Sauerstoffgebläses ausgesetzt werden. Das sind mehr oder weniger harte Silikate. Dies ist eine allen Chemikern und Physikern bekannte Tatsache;

---

[1]) Gemeint sind die Diamantpulver.

während die aus weißem kristallisierten Kandiszucker gewonnene Kohle, nachdem sie dem intensivsten Feuer der Säule unterworfen worden war, schwarze, beim Anfühlen weiche Kugeln liefert, die das Papier zeichnen wie Bleistiftsubstanz. Das ist Graphit!"

„Nach meinen zahlreichen Untersuchungen über das Schmelzen und Verdampfen der Kohle war es nicht zu vermuten, daß ich unreine Kohle zu Versuchen wählen würde, bei denen ich darauf hinzielte, diesen Körper kristallisieren zu lassen."

In bezug auf diese Diamantversuche resumiert Despretz:

„Au résumé: Ai-je obtenu des cristaux de carbone qu'on puisse isoler et peser, dont on puisse chercher l'indice de réfraction et l'angle de polarisation? Non, sans doute.

J'ai produit simplement, jusqu'à présent, par l'arc d'induction, et par des faibles courants galvaniques, du carbone cristallisé en octaèdres noirs, en octaèdres incolores, translucides, en lames incolores et translucides, dont l'ensemble a la dureté de la poudre de diamant, et qui disparaît dans la combustion sans résidu sensible."

Wo immer Despretz aus der Graphitbildung auf ein vorhanden gewesenes Schmelzphänomen schließt, ist dieser Schluß jedenfalls nicht eindeutig, insofern Moissan und andere nach Despretz gezeigt haben, daß sich Kohlenstoff, selbst in Diamantform, bei genügend hoher Erhitzung in Graphit verwandelt, ohne vorher flüssig gewesen zu sein. Der erwähnte Schluß ist nur erlaubt und beweiskräftig, wenn man, wie bei meinen Versuchen, das als Graphit analysierte Erstarrungsprodukt vor dem Erstarren in flüssigem Zustande greifbar vor sich gehabt hat (§ 27). Niemals aber hat Despretz die Schmelze in wirklich fließendem oder flüssigem Zustande ad oculos demonstrieren können.

§ 3.

Schmelzversuche von Moissan[1]).

Die epochemachenden Arbeiten Moissans und die mit seinem elektrischen Ofen erhaltenen Versuchsergebnisse werden immer

[1]) H. Moissan: 1. „Sur la préparation du carbone sous une forte pression." Compt. rend. **116**, 218 (1893). — 2. „Sur quelques propriétés nouvelles du diamant." Ebenda **116**, 460 (1893). — 3. „Analyse des cendres

ihren bleibenden Wert behalten, auch wenn wir auf Grund meiner Versuche nachweisen sollten, daß die Moissanschen Resultate in bezug auf das Schmelzen des Kohlenstoffs nicht beweiskräftig sind.

Bis dahin hatte man Kohle nur im Lichtbogen bzw. durch Joulesche Wärme zum Verdampfen gebracht. Moissan gelingt es, Kohle auch ohne diese Mittel in seinem elektrischen Ofen zu verdampfen. Ein in diesem befindliches Kohlenrohr füllt sich im Inneren sehr schnell mit leichtem schwarzen „rentrage", welches als das Kondensationsprodukt des Kohlendampfes anzusehen ist. Bei einem anderen Versuche bewirkt Moissan die Verbindung von Kohlendampf und Siliciumdampf zu feinen Nadeln von Siliciumkohlenstoff in Gestalt durchsichtiger Kristalle. Aus beiden Versuchen folgt, „daß bei der sehr hohen Temperatur des elektrischen Ofens der Kohlenstoff außerhalb des Lichtbogens verdampft".

Die folgenden Versuche sollten die Art und Weise ermitteln, auf welche sich der Kohlendampf der im elektrischen Ofen verdampfenden Kohlen bildet.

Die Einleitung zu diesen Versuchen lautet:

„Im allgemeinen geht ein Körper aus dem festen in den flüssigen Zustand über und nimmt bei einer genügenden Temperaturerhöhung den gasförmigen Zustand an. Verhält sich der Kohlenstoff ebenso, oder macht er eine Ausnahme von dieser Regel? Die folgenden Experimente werden die Antwort auf diese Frage geben."

Wegen der bedeutsamen und hemmenden Rolle, welche diese Versuche bis heute gespielt haben, wollen wir die Moissansche Beschreibung derselben möglichst wortgetreu wiedergeben.

1. „Wir haben ins Innere unseres elektrischen Ofens, der mittels eines Bogens von 80 Volt und 1200 Amp. geheizt wurde, einen kleinen Tiegel aus sehr reiner Kohle gestellt, in welchen der massive Deckel mit leichter Reibung sehr tief hineinragte.

---

du diamant." Ebenda **116**, 458 (1893). — 4. „Sur la vaporisation du carbone." Ebenda **119**, 776 (1894). — 5. „Sur quelques expériences nouvelles relatives à la préparation du diamant." Ebenda **123**, 206 (1896). — 6. „Étude du diamant noir." Ebenda **123**, 210 (1896). — 7. „Sur la transformation du diamant en graphite dans les tubes de Crookes." Ebenda **124**, 653 (1897). — 8. „Recherches sur les différentes variétés de carbone." Ann. de Chim. et de Phys. 1896, 7e série, t. VIII, p. 289, 306, 466.

Dieser Tiegel stand auf einem Würfel aus Kohle, der seinerseits durch ein Bett aus komprimierter Magnesia unterstützt war. Die Erhitzung hat 10 Minuten gedauert, und die erzeugte Wärme war groß genug, um mehrere hundert Gramm Kalk und Magnesia zu verdampfen."

„Nach dem Erkalten war der Deckel in Graphit verwandelt, aber die beiden Oberflächen waren nicht zusammengeschweißt."

2. „Legt man ein Stückchen oder «Schiffchen» (nacelle) aus Kohle in ein Rohr der gleichen Substanz und erhitzt dieses Rohr, sei es von außen, sei es von innen, mit Hilfe eines mächtigen Bogens, so erreicht man niemals, daß das Schiffchen an das Rohr angeschweißt ist (on n'arrive jamais à souder la nacelle au tube).

Läßt man in unserem elektrischen Röhrenofen einen Bogen von 1000 Amp. und 80 bis 90 Volt brennen, so kommt es oft vor, daß der oberste Teil des Rohres, der am meisten der Heizwirkung des Bogens ausgesetzt ist, sich durchlocht (se troue), ohne daß die Ränder der Öffnung auch nur eine Spur von Schmelzen erkennen lassen."

3. „Wir haben Zuckerkohle in einem geschlossenen Tiegel mit Hilfe eines Bogens von 1000 Amp. und 70 Volt erhitzt. Die Zuckerkohle hat ihre Form behalten; sie behält auch die Hohlräume (vacuoles), durch welche die Kohlenwasserstoffe im Moment ihrer Bildung sich frei gemacht haben. Sie ist ganz in Graphit verwandelt, dabei zeigt aber die staubartige Masse keine Spur von Verschweißung, wenn man sie in einem schwach vergrößernden Mikroskop untersucht."

4. „Erhitzt man auf gleiche Weise Graphit, Holzkohle oder durch Chlor gereinigte Retortenkohle, so findet man nach dem Versuch nur Graphit. Dabei hat jede Kohlenart ihre Form bewahrt, und man bemerkt keine Spur von Schmelzen oder Schweißen."

5. „Prüft man jetzt die Elektroden, welche bei diesen Experimenten aus möglichst reiner Kohle bestanden, so weisen diese keine Spur geschmolzener Substanz auf. Dabei hatte der Strom von 2200 Amp. bei 70 Volt die Umwandlung auf den Elektroden von 0,05 [1]) Durchmesser auf einer Länge von 15 cm vollzogen."

6. „Selbst wenn man das Ende der positiven Elektrode aus einem Kohlenzylinder fertigt und mit leichter Reibung justiert, so

---

[1]) Maßeinheit fehlt.

wird dasselbe nach der Bogenbildung deformiert, ist aber an die Elektrode nicht angeschweißt[1]). Wir müssen hinzufügen, daß dies nicht mehr so ist, wenn die angewandte Kohle Verunreinigungen enthält: Metalloxyde, Silicium oder Borsäure (acide borique). Wir haben schon mitgeteilt, daß die Borsäure in diesem Falle ein kristallisiertes, durch die Formel Bo_6C definiertes Borkarbid liefert. Dieses kann sich im Überschuß mit Kohle vereinigen und Körper hervorbringen mit dem Anschein, als ob sie in abgerundeter Form geschmolzen seien und Tröpfchen von zuweilen großer Härte gebildet hätten, die aber niemals aus reinem Kohlenstoff bestehen. Selbst eine sehr kleine Menge metallischer Verunreinigungen kann geschmolzene oder kristallisierte Carbüre geben, von denen ich einige früher beschrieben habe. Es ist darum unerläßlich bei diesen Experimenten, nur möglichst reine Kohlen zu verwenden."

Auf Grund dieser von mir numerierten sechs Versuche spricht Moissan als gesichertes Resultat aus, „daß die Kohle vom festen in den gasförmigen Zustand übergeht, ohne den flüssigen Zustand anzunehmen".

In der später publizierten zusammenfassenden Darstellung[2]) hat Moissan dieses Resultat etwas eingeschränkt: „Der Kohlenstoff kann mit dem Arsen verglichen werden, welches im Vakuum und auch beim gewöhnlichen Atmosphärendruck vom festen in den gasförmigen Zustand übergeht, ohne die flüssige Form anzunehmen. Wir meinen jedoch, daß der Kohlenstoff in den flüssigen Zustand übergeführt werden kann, aber dieses Phänomen kann nur bei sehr starken Drucken auftreten."

Leider ist über die Reinheit der von Moissan benutzten Kohlen nichts mitgeteilt, es sei denn, daß die Vorschrift, „möglichst reine" Kohlen zu nehmen, über die Reinheit der Kohlen etwas aussagen sollte! Jedenfalls glaubt Moissan, durch seine Versuche diejenigen von Despretz widerlegt zu haben.

Wie dem aber auch sei, jedenfalls ist die von Moissan aus seinen Versuchen gezogene Schlußfolgerung nach den heutigen Erkenntnissen (Kap. II, § 6) nicht erlaubt.

---

[1]) „On peut même former l'extrémité de l'électrode positive, par un cylindre de charbon, ajusté à frottement doux, et après l'arc est déformé, mais ne s'est pas soudé à l'électrode." Dieser Satz ist nicht ganz verständlich!

[2]) Ann. de Chim. et de Phys. 1896 (a. a. O.).

Auf Grund der von mir aufgefundenen Tatsache, daß die Schmelztemperatur des positiven Kraters der in freier Luft brennenden Bogenlampe nur bei Anwendung abnorm kleiner Stromstärken erreicht wird (vgl. § 21), können wir leicht den Beweis führen, daß die Moissanschen Versuche zum Schmelzen oder Schweißen der Kohle keinen Erfolg haben konnten. Ganz sicher ist dieser Beweis für alle jene Versuche zu erbringen, bei denen Moissan die Kohle in seinem elektrischen Ofen erhitzt. Dahin gehören die Versuche 1 bis 4.

Zunächst ist klar, daß der im elektrischen Ofen zu erhitzende Körper niemals die Temperatur des positiven Kraters der heizenden Bogenlampe erreichen kann, auch wenn noch so viele Bogenlampen im Ofen brennen. Selbst wenn man unter Zuhilfenahme meiner Versuchsergebnisse den positiven Krater der heizenden Bogenlampe auf die Schmelztemperatur bringen wollte, so würde die indirekt im Ofen erhitzte Kohle nicht auf die gleich hohe Temperatur, also auch nicht auf die Schmelztemperatur gebracht.

Moissan beschickt die heizenden Bogenlampen mit 1600 Amp. Unter Anwendung so hoher Stromstärken wird der positive Krater der in freier Luft brennenden Bogenlampe aber auch bei Anwendung sehr dicker Kohlen sicher nicht zum Schmelzen gebracht. Wie dick auch die Kohlen der Lampen gewesen sein mögen, eine solche enorme Stromstärke bringt gemäß meinen Versuchen die positive Kohle nur in festem Zustande zum Verdampfen, nicht aber zum Schmelzen. Also konnten erst recht nicht die im Ofen indirekt geheizten Kohlenstücke usw. zum Schmelzen gebracht werden oder Schweißerscheinungen zeigen.

Auf Grund dieser Darlegung ist auch dem Versuch 5 die Beweiskraft genommen, bei welchem die aus möglichst reiner Kohle bestehenden Elektroden der mit 2200 Amp. gebrannten Bogenlampe daraufhin geprüft werden, ob sie geschmolzen gewesen waren.

Was den Versuch 6 betrifft, so fragt es sich, ob die sich mit ihren Enden berührenden Kohlen durch Joulesche Wärme erhitzt worden sind, oder ob sich, wie ich annehme, zwischen den Enden nach dem Zünden ein Flammenbogen gebildet hatte. In letzterem Falle kann wegen der großen Stromstärke das Schmelzen nicht eintreten; in ersterem Falle beweist der Versuch nichts über das Schmelzen der Kohle im Flammenbogen.

§ 4.

Schmelzversuche von F. Braun[1]).

Bei seinen Versuchen über die elektrische Zerstäubung, welche eintritt, wenn durch einen dünnen, auf oder zwischen zwei Glasplatten gelegten Draht die Entladung einer Leidener Flaschenbatterie geleitet wird, unterwirft F. Braun auch dünne Kohlenfäden von Glühlampen von 0,052 mm Dicke diesem Verfahren[2]). „Da ich überschlug, daß es mir bei Anwendung größerer Batterien und möglichst kleiner Selbstinduktion möglich sein sollte, Kohlenfäden auf 20000 bis 30000° zu erwärmen, so wäre die Frage, ob man auch Kohlenstoff in Gaszustand überführen könne, durch solche Versuche vielleicht zu beantworten. Doch sind dabei eine solche Menge von Einwänden zu erledigen, daß ich von der Entscheidung der Frage Abstand nahm."

„Es gelang mir aber leicht, unter dem Mikroskop das Vorhandensein geschmolzener Kohlenstoffkügelchen zu erkennen. Sie sind im Aussehen nicht von geschmolzenen Metallkügelchen zu unterscheiden, wie sie sich unter ähnlichen Bedingungen (nämlich bei entsprechend kleinerer elektrischer Energie, wenn der Schmelzpunkt niedriger liegt) bilden."

Ob die von Braun erhaltenen Schmelzkügelchen geschmolzener reiner Kohlenstoff waren, ist nicht zu entscheiden, da jede Analyse der Schmelzprodukte und der Kohlenfäden fehlt, durch deren Zerstäubung sie gewonnen sind.

§ 5.

Schmelzversuche von La Rosa[3]).

Die einleitenden Worte, welche La Rosa seiner Abhandlung vorausschickt, lauten:

„Alte Versuche von Despretz ließen eine Zeitlang annehmen, daß auch der Kohlenstoff der Macht der Wärme nachgegeben

---

1) Ferdinand Braun, „Der Mechanismus der elektrischen Zerstäubung; Schmelzen von Kohlenstoff; Zerlegung von Metalllegierungen". Ann. d. Phys. 17, 359—363 (1905).

2) Es wurden 48 Flaschen bei 10 mm Schlagweite verwendet.

3) M. La Rosa, „Über das wahrscheinliche Schmelzen des Kohlenstoffs im selbsttönenden Lichtbogen und im Funken". Drudes Annalen 30, 369 bis 380 (1909).

habe. Unter der gleichzeitigen Wirkung des Lichtbogens usw. wurde die Erweichung des Kohlenstoffs, die Bildung und das Herabfließen kleiner Tröpfchen eines äußerst harten Körpers beobachtet, welcher den Rubin einritzte und deshalb für schwarzen Diamanten gehalten wurde. Die glänzenden Untersuchungen Moissans aber räumten mit diesem ersten Versuch vollständig auf."

Um dieses vernichtende Urteil zu bekräftigen, zitiert La Rosa das Resumé Moissans, und zwar in der zweiten Form (S. 12), in welcher der flüssige Zustand des Kohlenstoffs wenigstens bei Anwendung sehr hoher Drucke als möglich hingestellt wird. Andererseits polemisiert La Rosa meines Erachtens mit Recht gegen diese seitdem fast allgemein angenommene Schlußfolgerung, indem er schreibt:

„Offenbar enthalten dieselben mehr, als was sich aus den Versuchstatsachen ergibt. Diese zeigen nur, daß der Kohlenstoff bei der Temperatur des elektrischen Bogens ohne zu schmelzen sublimiert. Man konnte demnach nur behaupten, daß der Kohlenstoff bei gewöhnlichem Druck keinen innerhalb der durch den elektrischen Ofen erreichten Temperaturgrenzen liegenden Schmelzpunkt besitzt. Nimmt man dann weiterhin an, daß bei den Versuchen bei hohem Druck der Kohlenstoff den flüssigen Zustand erreichte, was aus den Versuchen Moissans nicht notwendig hervorgeht[1]), so könnte man noch behaupten, daß er einer jener Körper ist, welche unter der Wirkung eines starken Druckes einen niedrigen Schmelzpunkt annehmen."

„Um schließen zu können, daß der Kohlenstoff sich wie Arsen verhält, d. h. daß er bei gewöhnlichem Druck nicht in den flüssigen Zustand übergehen kann, mußte noch bewiesen werden, daß er bei der Temperatur des elektrischen Ofens oder auch bei niedrigeren Temperaturen bereits eine über Atmosphärendruck große Dampfspannung besitzt. Ein derartiger Umstand aber ist niemals durch den Versuch sichergestellt worden, ja in Anbetracht der geringen Verbrauchsgeschwindigkeit der Kohleelektroden im Lichtbogen wird man eher zu der Ansicht geführt, daß bis zu

[1]) Anmerkung von La Rosa: „In der Tat kann man, wie von einigen beobachtet worden ist, annehmen, daß die von Moissan erhaltenen kristallisierten Teilchen von dem Kohlenstoff stammten, welcher in dem flüssigen Eisen bei hoher Temperatur in Lösung gegangen war."

jener Temperatur die Dampfspannung des Kohlenstoffs erheblich kleiner ist als der atmosphärische Druck.

Wenn es so steht, läßt sich das Verhalten des Kohlenstoffs mit größerer Begründung dem des Jods an die Seite stellen ...

Jedenfalls kann, auch wenn man den Wert der Dampfspannung des Kohlenstoffs bis zur Temperatur des elektrischen Ofens vollkommen unbestimmt lassen will, das Verhalten des Kohlenstoffs mit demselben Recht sowohl mit dem des Arsens wie mit dem des Jods verglichen werden. Wir könnten demnach mit gleicher Wahrscheinlichkeit erwarten, daß der Kohlenstoff durch geeignete Temperatursteigerung und ohne Druckerhöhung geschmolzen werden kann oder nicht. Die Frage nach der Schmelzbarkeit des Kohlenstoffs bei gewöhnlichem Druck bleibt demnach offen; dem Versuch allein kommt die Entscheidung zu. Hierzu sind Hilfsmittel notwendig, welche höhere Temperaturen als die des elektrischen Ofens zu erreichen vermögen.“

Aus seinen Versuchen über die Umwandlung des Spektrums im selbsttönenden Lichtbogen[1]) schließt La Rosa, daß dieser Bogen eine Temperatur erreichen läßt, die höher ist als die Temperatur im gewöhnlichen Flammenbogen, weil „die auf der Bahn der Entladung aufgewendete mittlere spezifische Leistung bedeutend größer ist als diejenige, die man für den kontinuierlichen Bogen annehmen kann. Ja, unter einem gewissen Gesichtspunkt könnte man die Neigung Moissans zur Verwendung kolossaler Stromstärken in seinem elektrischen Ofen (bis zu 2200 Amp.) in Erörterung ziehen.“

Auf Grund dieser Betrachtungen versucht La Rosa die Kohle mit Hilfe des tönenden Lichtbogens zu schmelzen. Dazu wurde aus kristallisiertem Zucker erhaltener Kohlenstaub der Wirkung dieses Bogens ausgesetzt, und zwar befand sich der Kohlenstaub im Inneren eines geschlossenen Tiegels aus schwer schmelzbarer Materie, durch dessen Deckel und Boden die Kohlenelektroden in das Innere geführt waren.

Nach sorgfältiger Regulierung gelang es, auf der unteren, meist positiven Elektrode eine kleine Staubschicht zu erhalten, welche die volle Entwickelung der Oszillationserscheinung nicht erheblich

---

[1]) La Rosa, „Umwandlungen des Spektrums des selbsttönenden Lichtbogens“. Ann. d. Phys. **29**, 249—276 (1909).

hinderte. Nach einiger Zeit fanden sich „Inkrustationen“ auf den intakt gebliebenen Elektroden. Der innere Teil der Inkrustationen, welche mit dem Bogen in Kontakt waren, bestand aus fettig glänzendem Graphit: „Bei der Untersuchung unter dem Mikroskop lassen diese kleinen Graphitmassen keine Spur mehr von den Konturen und der Struktur der ursprünglichen Kohlenteilchen unterscheiden.“

Um zu entscheiden, ob diese „Inkrustationen“ durch Verunreinigungen verursacht sind, analysiert La Rosa das Ausgangsprodukt und den erhaltenen Graphit. Während die Zuckerkohle 0,08 Proz. Aschengehalt besaß, zeigt der Graphit nur noch einen Aschengehalt von 0,05 Proz. Die Kohlen der Elektroden (die reinsten, welche La Rosa sich verschaffen konnte) enthielten einen Aschengehalt von 0,33 Proz. La Rosa schließt aus diesem Befund, daß jene Inkrustationen durch geschmolzenen Kohlenstoff entstanden sind: durch das successive Ansammeln feinster „Kohlentröpfchen“, insofern die von der intermittierenden Entladung gerade getroffenen Kohlenteilchen den flüssigen Zustand annehmen und sich mit den Elektroden verschweißen, zwischen denen sie fortgesetzt hin und her geworfen werden.

Durch plötzliche Temperaturerniedrigung der herumschwirrenden Teilchen „flüssigen“ Kohlenstoffs will La Rosa auch einige Teilchen des Kohlenstaubes in Kristallform erhalten haben, welche nicht als Carborund usw. anzusprechen, sondern zum Würfel-Kristallsystem gehörige Diamantkristalle gewesen seien.

Außerdem hat La Rosa[1]) auch noch Versuche mit Joulescher Wärme wie Despretz angestellt, aus denen er ebenfalls auf die Existenz des flüssigen Zustandes der Kohle bei gewöhnlichem Druck schließen zu müssen glaubt: Die mit starken Strömen durch Joulesche Wärme erhitzten Kohlenstäbchen bogen sich infolge ihres eigenen Gewichtes durch.

Gegen die Schlußfolgerung aus diesen Versuchen wenden sich Watts und Mendenhall[2]), welche die Durchbiegung der Kohlenstäbchen nicht als Zeichen des Schmelzens ansehen, sondern auf die allmählich zunehmende Plastizität des Kohlenstoffs schieben.

---

1) La Rosa, „Über das Schmelzen des Kohlenstoffs mittels des Jouleschen Effektes“. Ann. d. Phys. **34**, 95—105 (1911).

2) O. P. Watts und C. E. Mendenhall, „Über das Schmelzen von Kohle“. Ann. d. Phys. **35**, 783—789 (1911).

La Rosa[1]) entgegnet ihnen in einer Note, welche er mit den Worten schließt:

„Nichtsdestoweniger kann man vielleicht annehmen, daß bei den von mir beschriebenen Versuchen effektiv die notwendigen Bedingungen für wahres Schmelzen erreicht werden, da der Körper (wie es scheint) in bedeutendem Grade jene Charaktere der Fluidität erwirbt, welche nach der älteren Anschauungsweise den flüssigen Zustand auszeichnen, und sich überdies nach dem Erkalten eine Ablagerung mit den Charakteren des kristallisierten Graphits findet (Fall der Graphitspritzer an der Porzellanschale).

Verhalten sich die Dinge genau in dieser Weise, so läßt sich sagen, daß wir vor einem wahren umgekehrten Übergang aus dem flüssigen (nicht unterkühlten) Zustand in den festen Zustand stehen. Dies würde beweisen, daß die Bedingungen des Schmelzens wirklich erreicht werden."

Ebenso wie bei Despretz sind es auch bei La Rosa nur „Indizienbeweise", aus denen er auf das Geschmolzengewesensein der Kohle schließt.

---

[1]) La Rosa, „Über das Schmelzen des Kohlenstoffs mittels des Jouleschen Effektes". Ann. d. Phys. 36, 841—847 (1911).

Kapitel II.

Eigene Untersuchungen.

A. Abhängigkeit der Bogenlampentemperatur von Stromstärke und Bogenlänge.

§ 6.

Problemstellung.

Seit langer Zeit nimmt man an, daß der positive Krater der Bogenlampe bei normalem Druck und normalen Stromverhältnissen eine maximale Temperatur annimmt, die durch noch so große Energiezufuhr nicht gesteigert werden kann. Als Grund für diese Erscheinung wird angenommen, daß der positive Krater die „Verdampfungstemperatur" der Kohle erreicht, über welche hinaus auch bei Anwendung stärkster Ströme der Kohlenstoff nicht erhitzt werden kann.

Bekanntlich geht nach der bisherigen Ansicht die Kohle der Bogenlampe direkt aus dem festen Zustand in den dampfförmigen Zustand über, ohne die flüssige Phase zu durchlaufen. Präziser spricht man bei einem solchen Vorgange vom „Sublimieren"; z. B. sublimiert bei normalem Druck Eis unter Null Grad Celsius, da das feste Eis sich direkt in Wasserdampf verwandelt.

Meines Wissens war Violle der erste, welcher von einer „Verdampfungstemperatur" der Kohle im Kohlenbogen sprach und auch die erste Temperaturbestimmung ausführte[1]). Ist die Viollesche Ansicht richtig, so muß die Temperatur der Bogenlampenkohle unabhängig von der Stromstärke und der Länge

[1]) J. Violle, „Sur la diffusion du carbone". Compt. rend. 94, 28—29 (1882).

des Flammenbogens sein. Seitdem hat man jene Frage mehrfach behandelt. Gleichwohl haben die bisherigen Untersuchungen meines Erachtens noch zu keinem endgültigen Resultate geführt.

Auch in bezug auf die Höhe der Temperatur weichen die Resultate der verschiedenen Beobachter voneinander ab. Wenn man von der Temperatur der Bogenlampe schlechtweg redet, so meint man stets die Temperatur des positiven Kraters, ohne über die Temperatur des „Kraters" der negativen Kohle[1]) etwas auszusagen, die meist sehr viel kleiner als diejenige des positiven Kraters ist. Da wir später sehen werden, daß die Temperatur des negativen Kraters ziemlichen Schwankungen unterliegt, so wollen wir, um mehr Klarheit zu schaffen, als „Normaltemperatur der Bogenlampe" diejenige Temperatur definieren, welche der positive Krater bei normalem Druck und bei normaler Belastung der Kohlen besitzt; es ist diejenige Temperatur, bei welcher der positive Krater in festem Zustande verdampft. Unter normaler Belastung sei die elektrische Energie verstanden, welche man bei gegebener Dicke der Kohlen zuführen muß, damit möglichst die ganze Oberfläche des positiven Kraters auf die Normaltemperatur gebracht wird. Verwendet man z. B. eine 6 mm dicke positive und eine dazu passende negative Kohle, so wird eine Stromstärke von etwa 12 Amp. genügen, damit obige Bedingung erfüllt wird.

Verwendet man zur Temperaturbestimmung ein optisches Pyrometer, so erhält man nur die „schwarze" Temperatur, welche notwendig kleiner als die wahre Normaltemperatur ist (vgl. § 17). Nehmen wir den Mittelwert der verschiedenen bisherigen Bestimmungen[2]), so erhalten wir für die „schwarze" Normaltemperatur der Bogenlampe rund 3700° abs.

Uns interessieren hier besonders diejenigen Versuche, welche sich auf die Abhängigkeit dieser Normaltemperatur von der Stromstärke und der Bogenlänge beziehen. Ausführlich haben sich mit

---

[1]) Obgleich die negative Kohle keinen Krater bildet, hat man sich daran gewöhnt, auch von einem negativen „Krater" zu reden.

[2]) Burgess u. Le Chatelier, „Measurement of high Temperatures", p. 454. New York, J. Wiley & Sons, 1912.

dieser Frage neuerdings Waidner und Burgess[1]) und ganz besonders M. Reich[2]) beschäftigt.

Waidner und Burgess konstatieren ein Steigen der Temperatur mit steigender Stromstärke, und zwar steigt die schwarze Temperatur von 3690° abs. bei 15 Amp. bis auf 3770° abs. bei 30 Amp. Reich dagegen findet, daß die Temperatur beider Krater von der Bogenlänge und Stromstärke unabhängig ist. Er scheint der erste gewesen zu sein, welcher auch dem negativen Krater seine Aufmerksamkeit schenkte. Sein Resultat bezieht sich auf die Bogenlampe, wenn dieselbe mit oszillierenden Strömen beschickt wird.

Zur Messung der Temperatur bedient sich Reich sowohl des optischen Pyrometers (nach Wanner) als auch der photographischen Methode, bei welcher aus der Stärke der Schwärzung auf die Größe der Temperatur geschlossen wird. Beide Methoden geben übereinstimmende Resultate, so daß Reich die von Waidner und Burgess gefundene Temperatursteigerung mit steigender Stromstärke auf eine fehlerhafte Anordnung der Versuche schiebt: Es sei das Licht des Flammenbogens nicht eliminiert worden.

Wie dem auch sei, jedenfalls stehen diese Versuchsresultate in Widerspruch zueinander. Freilich hätte mich diese geringe Diskrepanz zwischen Reich und Waidner-Burgess nicht veranlassen können, dieses Problem von neuem zu studieren. Die Gründe hierfür gehen aus dem Folgenden hervor.

Bei Verwendung von Gleichstrom findet Reich nämlich eine Differenz von über 500° zwischen der Temperatur des positiven und des negativen Kraters: für den positiven im Mittel 3700° abs., für den negativen 3140° abs. Es entsteht somit die Frage, ob auch die letztere Temperatur die „Verdampfungstemperatur“ der Kohle ist und ob auch sie unabhängig von Stromstärke bzw. Bogenlänge ist. Hören wir, was Simon[3]), in dessen Institut die Reichsche Arbeit mit großer Sorgfalt ausgeführt wurde, hierüber in einem vor kurzem erschienenen Artikel „Bogenlicht“ sagt:

---

[1]) C. W. Waidner und G. R. Burgess, „Die Temperatur des Lichtbogens“. Phys. Rev. 19, 241—258 (1904).

[2]) M. Reich, „Über Größe und Temperatur des negativen Lichtbogenkraters“. Phys. Zeitschr. 7, 73—89 (1906).

[3]) S. Simon, „Lichtbogenentladung“, Artikel im „Handwörterbuch der Naturwissenschaft“ 6, 204—244 (1912).

„Zahlreiche Untersuchungen haben sich mit der Entwickelung der Lichtbogentemperatur beschäftigt. Es ergibt sich als Mittel der zuverlässigsten Beobachtungen, daß die Temperatur des positiven Kraters rund 3500 bis 4000° beträgt, diejenige des sehr viel kleineren negativen Kraters 3100°. Beide Temperaturen sind unabhängig von Stromstärke und Bogenlänge. Das spricht dafür, daß beide Krater wohl die Verdampfungstemperatur der Kohle besitzen, so daß die Abweichungen der beiden Zahlen vermutlich lediglich in der großen Unsicherheit der Messungen ihren Grund haben. Während also die Temperatur der Krater von Stromstärke und Bogenlänge unabhängig ist, ändert sich die Größe der Kraterfläche je nach der Wärmezufuhr."

Zwingender kann meines Erachtens die Forderung nach neuen Untersuchungen über „die Verdampfungstemperatur" der Bogenlampenkohle gar nicht begründet werden. Insofern pflichte ich Simon bei, daß es nur eine Verdampfungstemperatur der Kohle beim Normaldruck geben kann. Wenn aber Simon diesem höheren Zwecke die Genauigkeit der Temperaturbestimmungen seines Schülers Reich opfert, indem er die Temperaturdifferenz von über 500° zwischen positivem und negativem Krater der „Unsicherheit der Messungen" zuschreibt, so muß ich Herrn Reich in Schutz nehmen. Gewiß ist die Temperaturmessung, zumal des negativen Kraters, nicht ganz leicht, weil ja die Ausdehnung des negativen Kraters cet. par. sehr viel kleiner ist als diejenige des positiven Kraters. Bei Reichs Versuchen war überdies auch der positive Krater relativ klein, wie sich aus den von Reich benutzten Stromstärken berechnen läßt. Außerdem springt, zumal bei Verwendung von sogenannten Homogenkohlen (ohne „Docht"), der Flammenbogen und damit auch die leuchtende Fläche der beiden Krater oft unruhig hin und her.

Aber trotz alledem können mit keinem Pyrometer so große Fehler gemacht werden, um durch sie Temperaturdifferenzen von über 500° erklären zu wollen. Mißt man doch bei allen optischpyrometrischen Methoden die Flächenhelligkeit der leuchtenden Kraterfläche, welche nach meinen später mitgeteilten Untersuchungen (vgl. § 14) bei der Normaltemperatur der Bogenlampe um etwa 8,5 Proz. steigt, wenn die absolute Temperatur des Kraters um 1 Proz. wächst. Oder in anderen Worten: Ein Fehler in der Temperaturbestimmung von 1 Proz. oder rund 40° bedingt

einen Fehler in der Messung der Flächenhelligkeit von 8,5 Proz.; um Fehler von 500° in der Temperaturbestimmung des Kraters zu machen, müßte man also Fehler von rund 70 Proz. in der photometrischen Messung der Flächenhelligkeit machen. Im übrigen sei schon hier erwähnt, daß bei einer normal gebrannten Bogenlampe tatsächlich der negative Krater eine sehr viel niedrigere Temperatur besitzt als der positive Krater.

Meine Problemstellung war somit gegeben: Erstens die Konstanz der Normaltemperatur („Verdampfungstemperatur") zu prüfen und dabei zu untersuchen, ob wirklich die Temperatur des negativen Kraters unter allen Bedingungen kleiner als die des positiven Kraters sei oder unter günstigen Umständen ebenfalls bis zur Normaltemperatur gesteigert werden könne. Außerdem wollte ich versuchen, durch Ermittelung der Strahlungsgesetze der Kohle der Bestimmung der wahren Temperatur des positiven Kraters etwas näher zu kommen. Letzteres Problem wird im Teil B dieses Kapitels behandelt, während Teil A die Antwort auf die ersteren Fragen enthält.

Wollte ich in bezug auf diese weiterkommen als meine Vorgänger, so mußte ich vor allem eine bessere Methode verwenden, um die Flächenhelligkeit auch des kleinsten und unruhigsten Kraters genau messen zu können. Da ich schon lange im Besitze einer solchen Methode bin, so brauchte ich diese nur dem vorliegenden Zwecke anzupassen.

§ 7.

Interferenzphoto- und -pyrometer[1]).

Bei den in der Technik üblichen Photometern zur Messung von Lichtstärken usw. liegt das photometrische Einstellungskriterium (z. B. Verschwinden einer Trennungslinie zwischen den zu vergleichenden Photometerfeldern) stets im Endlichen bzw. nicht auf den zu messenden Lichtquellen. Durch welche Hilfsmittel man auch die zu messende Strahlungsquelle zur Erleuchtung der Photometerfelder zwingt, ob durch Anwendung diffus reflektierender Flächen, Mattscheiben oder geeigneter Linsenkombinationen, stets befinden sich die Photometerfelder selbst in der

[1]) O. Lummer, „Über ein neues Interferenzphoto- und -pyrometer". Verh. d. Deutsch. Phys. Ges. 3, 131—147 (1901).

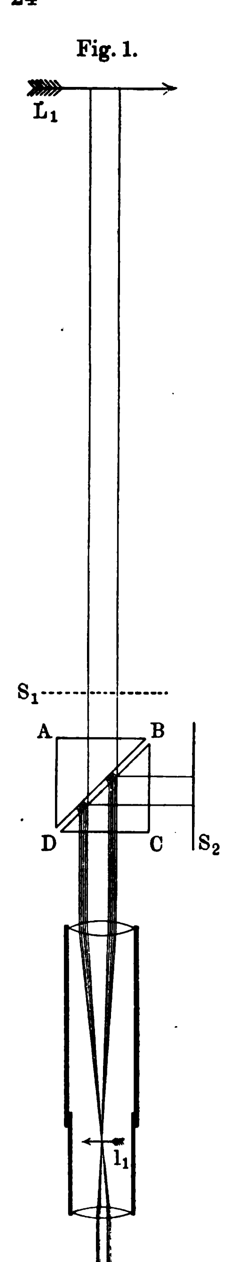


Fig. 1.

deutlichen Sehweite und können nicht zugleich mit der zu vergleichenden Lichtquelle deutlich gesehen werden.

Abweichend hiervon verhält sich mein „Interferenzphotometer“, bei welchem das photometrische Kriterium praktisch auf dem zu messenden im Endlichen oder Unendlichen befindlichen Objekt gelegen ist. Infolge dieser Eigenschaft bietet das Instrument die Möglichkeit, ohne Anwendung irgend welcher Linsen die Flächenhelligkeit bzw. Temperatur sehr kleiner und unruhiger Objekte zu messen oder sehr nahe benachbarte Teile einer leuchtenden Fläche in bezug auf ihre Helligkeit miteinander zu vergleichen.

An Hand der Fig. 1 ist das Prinzip dieses Photometers leicht darzulegen. Der Hauptbestandteil ist der Glaswürfel *ABCD*. Dieser ist aus zwei rechtwinkligen Glasprismen gleicher optischer Eigenschaften so zusammengesetzt, daß zwischen den Hypotenusenflächen eine planparallele Luftschicht *BD* bestehen bleibt. Die Dicke dieser Luftschicht wähle man so, daß man, durch den Würfel auf eine diffus leuchtende Fläche blickend, nahe an der Grenze der totalen Reflexion deutlich eine Reihe von Interferenzstreifen sieht. Ist die Luftplatte *BD* genau planparallel, so liegen diese Streifen im Unendlichen und sind „Kurven gleicher Neigung“ [1]). In diesem Falle verlaufen die Streifen parallel

[1]) O. Lummer, „Über eine neue Interferenzerscheinung an planparallelen Platten usw.“. Inaug.-Dissert. Berlin 1884, abgedruckt in Wied. Ann. 23, 49—81 (1884).

zur Grenze der Totalreflexion; ihr gemeinsames Zentrum liegt auf der zur planparallelen Luftplatte BD errichteten Normalen. Da man längs dieser Normalen nicht blicken kann, so erscheinen die Interferenzkurven als nahezu geradlinige zur totalen Reflexionsgrenze parallel laufende Streifen. Um diese absolut scharf zu sehen, muß man das Auge auf Unendlich einstellen oder sich eines auf Unendlich eingestellten Fernrohres bedienen.

Je stärker man die Vergrößerung des Fernrohres wählt, um so genauer muß dieses auf Unendlich eingestellt werden, damit die Streifen scharf erscheinen. Daraus folgt, daß dann auch das anvisierte Objekt L_1 (Flamme, Bogenlampenkrater usw.) im Unendlichen liegen muß, wenn es gleichzeitig mit den Streifen im Fernrohr scharf gesehen werden soll. Bei irdischen Objekten, wie bei der Photometrierung des Kraters der Bogenlampe, bringt man diese daher in die Brennebene einer vor AB, etwa bei S_1 stehenden Linse.

Natürlich sind die Streifen im Fernrohr auch noch zu sehen, wenn man die Flamme oder eine diffus leuchtende Mattscheibe direkt vor AB stellt, nur ist dann von dieser selbst bzw. von ihren Einzelheiten nichts zu sehen. Will man das lichtgebende Objekt zugleich mit den Streifen deutlich sehen, so muß sein Bild in der Brennebene des Fernrohres liegen.

Bei Beobachtung mit bloßem Auge und bei genügend dünner Luftplatte genügt die deutliche Sehweite, um Streifen und Objekt zugleich deutlich zu sehen.

Um die Flächenhelligkeit des anvisierten Objektes zu messen, bringt man bei S_2 eine von der Vergleichslichtquelle L_2 gleichmäßig beleuchtete Mattscheibe an. Leuchtet diese allein, so sieht man im Fernrohr ebenfalls eine Kurvenschar längs der totalen Reflexionsgrenze, und zwar auf hellem, gleichmäßigen Hintergrunde, da vom Korn der Mattscheibe S_2 selbst nichts zu erkennen ist. Diese Kurvenschar im reflektierten Lichte ist genau komplementär zu derjenigen im durchgehenden Lichte: wo die eine Maxima hat, besitzt die andere Minima und umgekehrt.

Werden also beide Mattscheiben, S_1 und S_2, von ihren zugehörigen Lichtquellen L_1 bzw. L_2 gleich hell und mit gleich zusammengesetztem Lichte beschienen, so verschwinden die

Streifen im Fernrohr. Verschiebt man jetzt L_1 oder L_2, so daß ihre Entfernung von S_1 oder S_2 und die Helligkeit dieser Mattscheiben eine andere wird, so treten die Streifen sogleich wieder auf, hell auf dunklerem Grunde oder dunkel auf hellerem Grunde, je nachdem man S_1 heller oder dunkler als S_2 gemacht hat.

Die Einstellungsgenauigkeit hängt von der Schärfe der Streifen, d. h. vom Intensitätsabfall vom Maximum zum Minimum hin ab. Wie ich an anderem Orte [1]) gezeigt habe, sind diese Interferenzstreifen in der unmittelbaren Nähe der totalen Reflexionsgrenze die schärfsten, welche überhaupt existieren. Sie haben infolge der Mitwirkung aller vielfach hin und her reflektierten Strahlen innerhalb der Luftplatte BD die theoretisch maximale Schärfe, welche ich als „Airysche Schärfe“ bezeichnet habe, da bekanntlich Airy zuerst die Formel für die Schärfe der von unendlich vielen gleichartigen Strahlenanteilen gebildeten Interferenzstreifen hergeleitet hat.

Dieser Airyschen Schärfe ist die relativ große Genauigkeit der photometrischen Einstellung bei meinem Interferenzphotometer zu verdanken. Bei gleicher Zusammensetzung des von L_1 und L_2 kommenden Lichtes, in welchem Falle das Verschwinden der Streifen allein ein vollkommenes ist, beträgt der mittlere Fehler des Resultates bei 10 Einstellungen etwa 1 Proz. Ist L_1 eine rötlich gefärbte und L_2 eine bläulich gefärbte Lichtquelle, so kommen die Streifen niemals zum Verschwinden. Und doch ist selbst dann noch eine Art Einstellung möglich, da das Streifensystem, im weißen Lichte erzeugt, einen fast vollkommen „achromatischen“ Streifen besitzt. Infolgedessen kann man auch bei verschiedener Färbung der Lichtquellen L_1 und L_2 noch photometrieren, indem man den achromatischen Streifen, so gut es geht, zum Verschwinden bringt.

Um das Interferenzphotometer zu einem Interferenz„pyrometer“ zu machen, braucht man dasselbe, wie bei den gewöhnlichen optischen Pyrometern, nur mit Hilfe des absolut schwarzen Körpers zu eichen.

---

[1]) O. Lummer, „Über Komplementärerscheinungen im reflektierten Lichte“. Ber. d. Berl. Akademie 24, 504—513 (1900).

§ 8.
Versuchsanordnung zur Messung der Flächenhelligkeit des Bogenlampenkraters.

Will man, wie im vorliegenden Falle, nur prüfen, ob sich die Temperatur des positiven Kraters der Bogenlampe mit der Stromstärke usw. ändert, so ist dies gleichwertig mit der Untersuchung, ob sich die Flächenhelligkeit des Kraters ändert, da Kohle sicher ein Temperaturstrahler ist. Wie wir später zeigen werden, strahlt die Kohle angenähert wie ein „grauer" Körper (§ 13 und 17). Anders ist es, wenn man die Größe einer eventuellen Temperaturänderung kennen lernen will. In diesem Falle muß man auch noch den Zusammenhang zwischen Temperatur und Flächenhelligkeit kennen, um aus letzterer auf erstere schließen zu können. Hiervon handelt § 14.

Fig. 2.

Zur genauen Messung der Flächenhelligkeit des Kraters wählte ich die in Fig. 2 skizzierte Versuchsanordnung. *ABCD* ist der Photometerwürfel und F_1 das Beobachtungsfernrohr. Die Interferenzstreifen im reflektierten Lichte werden durch die Strahlen der Mattscheibe S_2 gebildet, welche von der Vergleichslichtquelle L_2 beleuchtet wird. Die Interferenzstreifen im durchgehenden Lichte werden von den Strahlen der Bogenlampe L_1 gebildet. Als solche wurde die in Fig. 3 abgebildete und in der Werkstatt des Breslauer Physikalischen Instituts von Herrn Mechaniker Sass konstruierte und angefertigte Bogenlampe mit Handregulierung benutzt, welche wenigstens für kurze Zeiten eine Strombelastung bis zu 150 Amp. aushält. Bei ihr ist die eine

Kohle horizontal, die andere vertikal gelagert. Will man den positiven Krater photometrieren, so macht man die horizontale Kohle zur positiven und wählt zur negativen eine entsprechend dünnere vertikale Kohle. Bei Messungen am negativen Krater macht man es umgekehrt. Es liegt also stets der zu untersuchende Krater nahe in einer Vertikalebene, so daß alle seine Teile im Fernrohr zugleich sichtbar sind.


Fig. 3.



Damit die Kraterfläche zugleich mit den Interferenzstreifen in der Brennebene des auf Unendlich eingestellten Fernrohres deutlich erscheint, muß sie in der Brennebene des Objektivs o_1 liegen.

Um die enorme Flächenhelligkeit des Kraters genügend abzuschwächen und derjenigen der Mattscheibe S_2 nahe gleich zu machen, wurden die aus dem Objektiv o_1 parallel austretenden Kraterstrahlen einer viermaligen Reflexion unterworfen, und zwar an den ebenen Flächen der Glasprismen p_1 bis p_4. Durch Überziehen mit Asphaltlack war das Reflexionsvermögen der nicht benutzten Prismenflächen so geschwächt, daß die durch innere Reflexion entstehenden Bilder des Kraters nicht störten. Tat-

sächlich sah man im Fernrohr nur ein Bild des Kraters, auf dessen Einzelheiten (Risse, Docht usw.) absolut scharf eingestellt werden konnte.

Fig. 4.

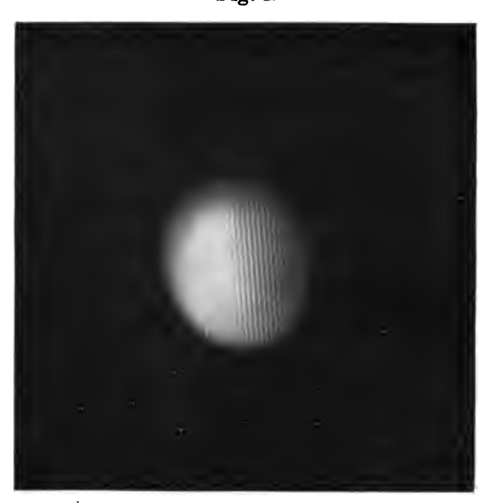
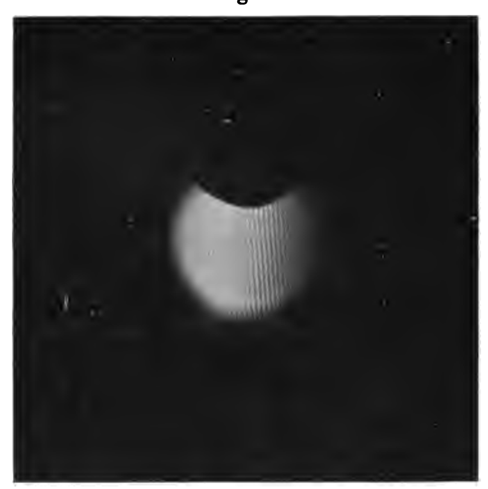


Fig. 5.

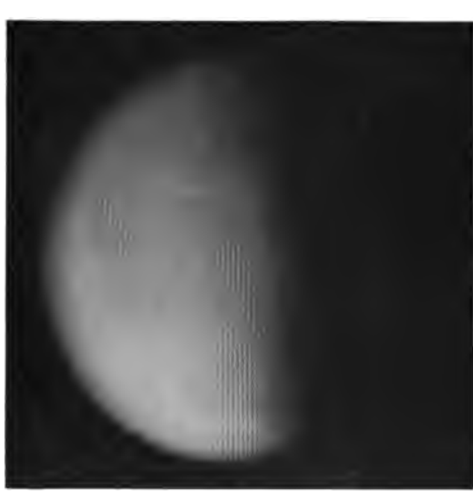


Selbstverständlich wurden die Prismen so justiert, daß die von p_4 kommenden Strahlen den Würfel $ABCD$ nahe dem Winkel der totalen Reflexion durchsetzten, so daß die ganze Krateroberfläche von den Interferenzstreifen durchzogen war.

In Fig. 4 und 5 sind zwei Aufnahmen des von den Streifen durchzogenen Kraters reproduziert, und zwar bei langem und bei kurzem Flammenbogen, in welch letzterem Falle die negative Kohle zum Teil die positive Kraterfläche verdeckt.

Auch die von der Vergleichslichtquelle L_2 zur Mitte der Mattscheibe S_2 zielenden Lichtstrahlen waren so gerichtet, daß sie bei gedachter Verlängerung die Luftplatte BD unter dem totalen Reflexionswinkel trafen. Bei alleinigem Leuchten von L_2 bzw. S_2 war dann das ganze Sehfeld erleuchtet und zum großen Teile mit den Interferenzstreifen im reflektierten Lichte durchsetzt, wie es die Fig. 6 zeigt. Um diese Justierung bewirken zu

Fig. 6.



können, waren die Lichtquelle L_2 und die Mattscheibe S_2 auf einer Photometerbank montiert, welche als Ganzes in die vorgeschriebene Strahlenrichtung gebracht werden konnte.

Die Vergleichslichtquelle L_2 ist auf der Photometerbank meßbar zu verschieben, die Mattscheibe S_2 fällt mit dem Nullpunkt der Skala zusammen. Als Vergleichslichtquelle diente meist eine starkfadige Nernstlampe mit drei Parallelfäden, deren Strom auf konstanter Stärke gehalten und deren Leuchtstärke von Zeit zu Zeit mit derjenigen einer geeichten Glühlampe verglichen wurde.

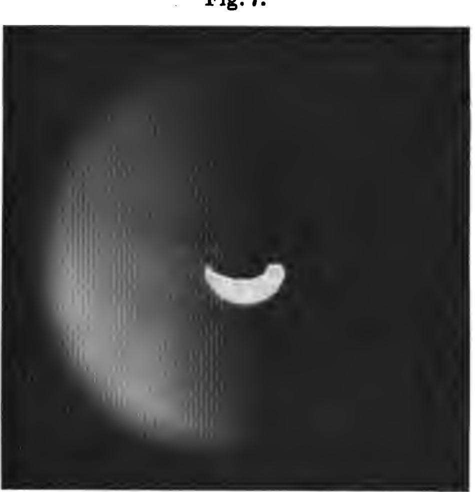
§ 9.

Meßmethode.

Subjektive Beobachtung. Objektive Aufnahme.

Leuchten gleichzeitig die Bogenlampe und die Vergleichslichtquelle, so sieht man im allgemeinen sowohl auf dem Bogenlampenkrater als auch im übrigen Gesichtsfelde Interferenzstreifen. Durch Verschieben der Vergleichslichtquelle kann man die Streifen auf dem Krater zum Verschwinden bringen. In den Fig. 7 bis 9

Fig. 7.



ist diese Konstellation festgehalten, und zwar bei Anwendung verschieden starker Ströme, also verschieden großer Leuchtflächen des positiven Kraters. Da bei der photographischen Aufnahme dieser Erscheinungen die Stellung der Vergleichslichtquelle nicht geändert worden ist, so sprechen schon diese Figuren für die Konstanz der Flächenhelligkeit des positiven Kraters bei verschiedener Belastung der Bogenlampe. Besonders schön sind auf diesen Reproduktionen die Streifen der Nernstlampe auf der dunkel erscheinenden negativen Kohle zu sehen.

Ist die positive Kraterfläche nicht auf allen Teilen gleich hell, so kommen die Streifen auch nicht auf allen Teilen zugleich zum Verschwinden. Benutzt man z. B. eine Dochtkohle, so wird der Dochtinhalt oft herausgeworfen, und der kreisrunde

Dochtquerschnitt leuchtet sehr viel dunkler als die ringsherum befindliche Kohle. In diesem Falle erscheinen die Streifen scharf

Fig. 8.

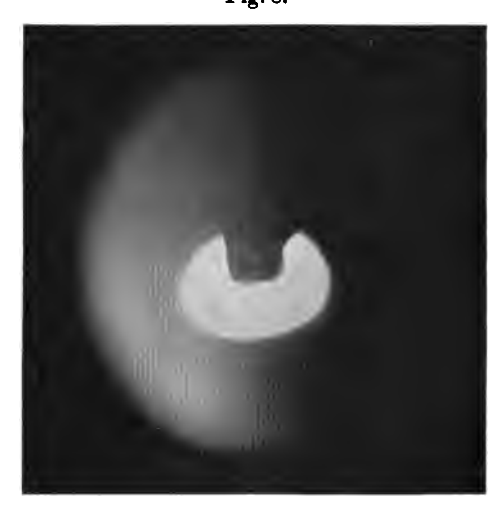


Fig. 9.



auf der kreisrunden Dochtfläche, wenn sie auf dem Kohlenkrater zum Verschwinden gebracht sind.

Hat man bei normalem Zustande des Kraters die Streifen auf dessen Oberfläche zum Verschwinden gebracht, so genügt die

bloße Beobachtung ohne Verschiebung der Nernstlampe, d. h. ohne eine eigentliche Messung, um zu erkennen, ob sich die Helligkeit der Kraterfläche bei Änderung der Stromstärke oder der Bogenlänge ebenfalls ändert oder konstant bleibt. Wenigstens wenn man sich mit der Prüfung einer Helligkeitsänderung von etwa 8 Proz. begnügt, welche einer Temperaturänderung von 1 Proz. entspricht.

Bei ruhig stehendem Bogen, und falls die ganze Kraterfläche eine gleichmäßig leuchtende Fläche bildet, kann man natürlich durch wiederholte photometrische Einstellung leicht genauere Resultate erzielen. Da diese Bedingungen aber, zumal bei langem und leicht abreißendem Bogen oder bei relativ kleiner Stromstärke und demgemäß kleiner, unruhiger Kraterfläche nicht erfüllt sind, so ist man hier auf die bloße Beurteilung angewiesen: Ob die bei normalem Brennen auf der Kraterfläche zum Verschwinden gebrachten Streifen bei Änderung der Bogenlänge oder Stromstärke wieder auftauchen oder verschwunden bleiben. Während man mit einem optischen Pyrometer den unruhig hin und her irrenden kleinen Krater erst gleichsam einfangen muß, irrt er bei meiner Anordnung im dauernd beobachtbaren Streifensystem der Vergleichslichtquelle herum, und man kann somit mit aller Ruhe beurteilen, ob auf ihm die Streifen verschwunden sind oder nicht.

Es mögen noch einige Winke mitgeteilt werden, die man bei der in Fig. 2 skizzierten Versuchsanordnung beachten muß, um ein brauchbares photometrisches Phänomen zu erzielen. Erstens kann, wie erwähnt, ein vollkommenes Verschwinden der Streifen laut Theorie nur eintreten, wenn beide Lichtquellen (Bogenlampe und Vergleichslampe) gleiche „Färbung“ besitzen. Da dies bei Benutzung einer Nernst- oder Fadenglühlampe usw. nicht der Fall ist und eine zweite Bogenlampe als Vergleichslichtquelle zwar versucht, aber als zu umständlich verworfen wurde, so benutzte ich ein geeignet gefärbtes blaues Glas vor der Mattscheibe S_2, durch welches das Licht der Vergleichslampe demjenigen der Bogenlampe etwas ähnlicher gemacht wurde.

Zweitens kommen die Streifen nur vollständig zum Verschwinden, wenn das auf den Würfel fallende Licht beider Lichtquellen unpolarisiert ist. Ist wie in unserem Falle das viermal an Glasflächen reflektierte Licht aber teilweise polarisiert (und

auch das von der Mattscheibe kommende Licht dürfte nicht ganz unpolarisiert sein), so tritt nicht nur kein vollständiges Verschwinden ein, sondern im Moment der Einstellung verdoppeln sich die Streifen[1]). Um diesen Fehler zu eliminieren, verwendet man ein Nicolsches Prisma vor der Würfelfläche CD in solcher Stellung, daß seine Schwingungsebene senkrecht zur Reflexionsebene (Horizontalebene) steht. Gleichzeitig tritt hierdurch eine Verschärfung der Interferenzstreifen ein[2]).

Photographische Aufnahme. Auch in bezug auf die photographische Aufnahme des Phänomens mögen einige Worte erlaubt sein. Um das im Fernrohr subjektiv beobachtete Phänomen gleichzeitig photographisch aufnehmen zu können, dient das Rohr F_2 (Fig. 2) mit einem guten Objektiv o_3 nahe der Würfelfläche AD und einer lichtdicht eingesetzten photographischen Kassette K am anderen Ende. Zunächst sei erwähnt, daß man beim Ersetzen der Kassette durch ein Okular im Fernrohr F_2 gleichzeitig alles sieht, was man im Fernrohr F_1 beobachtet, nur daß in beiden Fernrohren das „durchgehende" und das „reflektierte" Einzelphänomen miteinander vertauscht werden.

Um auf der photographischen Platte der Kassette K scharfe und deutliche Abbilder des Gesamtphänomens zu erhalten, muß die Platte genau in der Brennebene des Objektivs o_3 stehen. Zu diesem Zwecke war die Kassette innerhalb eines geringen Intervalls lichtdicht beweglich. Um genügend große Originalaufnahmen (vgl. die Fig. 4 bis 9) zu erhalten, wurde als photographisches Objektiv o_3 das Objektiv von 120 cm Brennweite eines guten astronomischen Refraktors verwendet.

Bei der photographischen Aufnahme des im Fernrohr F_2 subjektiv eingestellten und gesehenen Phänomens stellten sich anfangs gewisse Schwierigkeiten ein, die so recht erst lehrten, eine wie große Rolle das benutzte Licht bei der Entstehung der Interferenzstreifen im Würfel spielt. Ohne vorherige Überlegung versuchte ich anfangs das im Fernrohr F_2 eingestellte Phänomen mit gewöhnlichen Trockenplatten zu photographieren,

---

[1]) O. Lummer, „Die Interferenzkurven gleicher Neigung im polarisierten Lichte". Ann. d. Phys. **22**, 49—63 (1907).

[2]) O. Lummer und E. Gehrcke, „Über die Anwendung der Interferenzen an planparallelen Platten zur Analyse feinster Spektrallinien". Ann. d. Phys. **10**, 457—477 (1903).

in der Erwartung, das reproduziert zu finden, was ich während der Aufnahmezeit im Fernrohr F_1 kontrolliert hatte. Die Aufnahme zeigte ein ganz anderes Phänomen: Da, wo das Auge Streifen gesehen hatte, waren auf der Platte keine Streifen; diese waren an einer ganz anderen Stelle, und zwar weiter von der totalen Reflexionsgrenze entfernt, etwa so, wie wenn man durch ein blaues Glas beobachtet hätte. Hat man nämlich ohne blaues Glas das Verschwinden der Streifen auf der Kraterfläche hergestellt und hält jetzt das blaue Glas vor das Auge, so rutscht das ganze Interferenzphänomen von der totalen Reflexionsgrenze fort, der Streifenabstand ändert sich usw. Um das subjektiv beobachtete Phänomen photographisch zu reproduzieren, muß man also Platten anwenden, welche auf den gleichen Wellenbezirk reagieren wie das Auge und die gleiche Helligkeits-Empfindlichkeitskurve besitzen. Nach längerem Probieren mit den verschiedensten sogenannten „farbenempfindlichen" Platten gelang die photographische Aufnahme (vgl. die Fig. 4 bis 9), wenigstens in einigermaßen getreuer Wiedergabe mit Wratten- und Wainwrightplatten.

§ 10.
Messungsergebnisse.
(Konstante Temperatur des positiven Kraters der Bogenlampe beim Normaldruck.)

Zur Untersuchung der Frage, ob die Temperatur des positiven Kraters der in freier Luft brennenden Bogenlampe unabhängig von Stromstärke und Bogenlänge ist, wurde die im vorigen Paragraphen beschriebene Versuchsanordnung benutzt. Um in kleinen Abstufungen bis zu Stromstärken von 120 Amp. fortschreiten zu können, wurde in den Stromkreis der Bogenlampe der aus Fig. 16, S. 58, ersichtliche und in der Werkstatt des Instituts gefertigte Widerstand W zugleich mit einem passenden Amperemeter eingeschaltet.

Bei Benutzung einer 22 mm dicken positiven Kohle wurde der Strom von 10 bis 80 Amp. variiert und bei jeder Stromstärke der Bogen bis zum Abreißen verlängert. Hatte man die Interferenzstreifen bei normaler Belastung der Bogenlampe (etwa 30 Amp.) auf dem positiven Krater durch Verschieben der Vergleichslichtquelle zum Verschwinden gebracht, so blieben sie

verschwunden, gleichviel ob man die Stromstärke oder die Bogenlänge änderte, wenn man die jeweils hellste Stelle der Krateroberfläche ins Auge faßte. Denn nicht immer leuchtet der ganze positive Krater an allen Teilen gleich hell. Von der Dochtkohle hatten wir schon berichtet, daß die Dochtfläche in ihrer Helligkeit bedeutend schwankt, je nachdem das Dochtmaterial mit der Kraterfläche abschließt oder aus dem Dochtkanal zum Teil herausgeschleudert ist. In letzterem Falle vermag der Flammenbogen das Innere des hohlen Dochtkanals nicht stark zu erhitzen. Daß der Flammenbogen überhaupt nur immer da die höchste Temperatur erzeugt, wo er gerade die Kohle „anbeißt“, und daß er auch dort nur oberflächlich heizt und die Kohle nicht bis zu größeren Tiefen zum Glühen bringt, erkennt man bei Verwendung von möglichst reinen Homogenkohlen (ohne Docht). Bei diesen sitzt der Bogen viel weniger fest als bei den Dochtkohlen, deren Docht meist aus mit Salzen imprägniertem Kohlenpulver besteht; auch zeigt der positive Krater nach kurzem Brennen Risse und tiefgehende Spalten. Die kleinsten Risse heben sich schwarz vom hellen Krater ab, ein Zeichen, daß der Bogen nicht in die Tiefe „frißt“; auch bilden sie ein Hindernis insofern, als der Bogen nur ungern über einen Riß hinwegzüngelt. Hat andererseits der Bogen längere Zeit an einer Stelle geheizt und springt an eine andere Stelle über, so nimmt die Helligkeit der ersteren Stelle momentan um beträchtliches ab, und auf ihr treten deutlich die Interferenzstreifen auf. Darum muß man, da der Bogen die Kohle nur in der dünnsten Oberflächenschicht auf die höchst mögliche Temperatur zu erhitzen und im allgemeinen nicht die ganze Oberfläche des Kraters zugleich auf die Verdampfungstemperatur zu bringen vermag, stets auf die hellste Stelle achten.

Öfter kommt es vor, daß der Bogen mit „zischendem“ Geräusch brennt. Dann flackern die vorher zum Verschwinden gebrachten Streifen auf, und zwar in dem Sinne, daß auf eine größere Flächenhelligkeit geschlossen werden muß. Dies ist auch der Fall, wenn bei Verwendung einer Dochtkohle plötzlich ein „pfeifender“ Strahl von Dochtsubstanz aus dem Dochtkanal hervorschießt. Aus diesem Grunde wurden bei den Messungen nur Homogenkohlen verwandt und „zischende“ Bogen von den Messungen ausgeschaltet.

Bei einer positiven Homogenkohle von 17,5 mm Durchmesser konnte der Bogen von 1 bis 18 mm Länge variiert werden, während

die Stromstärke von 10 bis 68 Amp. gesteigert wurde. Auch hier blieb die Flächenhelligkeit innerhalb der Einstellungsgenauigkeit konstant, so daß die Temperatur bis auf 1 Proz., d. h. etwa 40° bei einer wahren Normaltemperatur von rund 4200° absolut (§ 17) die gleiche geblieben ist.

Um die positive Kohle wenn möglich zu überhitzen, wurde als positive Kohle ein relativ dünner Stab von nur 8 mm Durchmesser verwandt und mit Strömen bis über 40 Amp. beschickt. Als negative Kohle diente eine etwa 16 mm dicke Kohle. Obgleich in diesem Falle die positive Kohle beim Maximalstrom fast auf ihrer ganzen Länge bis zu hoher Weißglut erhitzt wurde, war die Flächenhelligkeit des positiven Kraters die normale und ganz die gleiche wie bei Anwendung des normalen Stromes. Über eine gewisse maximale Stromstärke kann man bei gegebener Kohlendicke nicht hinausgehen, da sonst der Bogen „faucht" und „sprüht" und die Kraterfläche ein „fleckiges" Aussehen erhält, insofern benachbarte Stellen sehr verschieden hell sind.

Die mit verschiedenen Homogenkohlen angestellten Versuche erlauben den Schluß, daß innerhalb weiter Grenzen in bezug auf Bogenlänge und Stromstärke die Flächenhelligkeit, also auch die Temperatur des positiven Kraters, wenigstens an dessen hellster Stelle, konstant ist [1]).

§ 11.

Flächenhelligkeit des negativen Kraters beim Normaldruck (keine konstante Temperatur).

Um den negativen Krater bequem beobachten zu können, wurden die in ihren Dimensionen zueinander passenden Kohlen vertauscht, d. h. die dünnere Kohle als horizontale, negative und die dickere als vertikale, positive Kohle genommen. Dann präsentiert sich also der volle negative Krater mit allen seinen Einzelheiten im Fernrohr, während, wenigstens bei relativ kleinem Bogen, auch ein Teil des leuchtenden positiven Kraters gleich-

[1]) Diese Schlußfolgerung, welche aus den vor einem Jahre ausgeführten Versuchen gezogen und im Leipziger Vortrage mitgeteilt worden ist, bedarf heute insofern einer Einschränkung, als sie nicht mehr gilt, wenn die Stromstärke so klein gewählt wird, daß der positive Krater den flüssigen Zustand annimmt (vgl. dieses Kapitel C).

zeitig zu sehen ist. Ohne jede Messung konnte man durch bloße Betrachtung der Interferenzstreifen konstatieren, daß für gewöhnlich der negative Krater sehr viel dunkler als der positive ist. Hatte man nämlich die Streifen auf der perspektivisch sich darbietenden positiven Kraterfläche zum Verschwinden gebracht, so traten sie auf dem negativen Krater sehr deutlich dunkel heraus, ein Zeichen, daß die Flächenhelligkeit des negativen Kraters sehr viel kleiner als die des positiven Kraters war. Man mußte die Nernstlampe weiter von der Mattscheibe entfernen, um die Streifen auf der negativen Kraterfläche zum Verschwinden zu bringen.

Beim normalen Brennen verhält sich die Flächenhelligkeit des positiven Kraters zu derjenigen des negativen etwa wie 4:1, woraus man auf eine Temperaturdifferenz von etwa 14 Proz. oder von rund 600° schließen darf (§ 14). Übrigens möchte ich auf die Größe dieser Temperaturdifferenz keinen besonderen Wert legen, da sie, wie wir sehen werden, unter geeigneten Bedingungen bis auf Null reduziert werden kann.

Will man versuchen, auch den negativen Krater auf die Verdampfungstemperatur zu bringen, so muß man wegen der Kleinheit dieses Kraters vor allem dafür sorgen, daß die Wärmeverluste durch Leitung und Strahlung möglichst vermieden werden. Um dies zu erreichen, kombinierte ich einen nur 4,5 mm dicken Kohlenstab als negative Kohle mit einer 16 mm dicken positiven Kohle. Bei Anwendung starker Ströme wird die negative Kohle auf der ganzen Länge weißglühend, so daß die Ableitung der Wärme relativ klein ist. Dies allein genügt aber nicht, vielmehr muß man auch noch dafür sorgen, daß die Ausstrahlung auf ein Minimum reduziert wird, indem man die Bogenlänge so klein macht, daß die Spitze der negativen Kohle gerade über die Mitte des sehr viel größeren positiven Kraters zu liegen kommt. Jedenfalls habe ich nur in diesem Falle ein gleichzeitiges Verschwinden der Streifen auf beiden Kratern zugleich erhalten können. Aber auch dieses überraschende und von mir stets mit Freude begrüßte Phänomen ist nicht immer zu beobachten, vielmehr muß man stets abwarten, bis der Flammenbogen die positive, vertikal gestellte Kohle gerade am vorderen, d. h. im Fernrohr sichtbaren Teile „anbeißt“. Später habe ich während des Brennens die positive Kohle in ihrer Fassung um ihre vertikale Achse gedreht, bis der positive leuchtende Krater gerade jene günstige

Lage besaß. Niemals aber ist es mir gelungen, den negativen Krater heller als den positiven zu erhalten. Nach diesen Ergebnissen kann man beim negativen Krater also nicht von einer konstanten Verdampfungstemperatur bei Atmosphärendruck sprechen.

B. Strahlungsgesetz und Strahlungseigenschaften der Kohle in Glühlampen und Bogenlampen.

§ 12.

Temperaturbestimmung der Leuchtfäden in Platin- und Kohlenfaden-Glühlampen.

Neuere von mir ausgeführte Untersuchungen[1]), die wahre Temperatur der Glühfäden in den verschiedenen Typen von Glühlampen zu bestimmen, haben meines Erachtens auch für unser vorliegendes Thema eine große Bedeutung gewonnen. Sind die dort erhaltenen Resultate doch der Ausgangspunkt weiterer, noch nicht publizierter Untersuchungen geworden, welche uns in den Stand setzen, die wahre Größe der „Normaltemperatur" des positiven Kraters der Bogenlampe zu bestimmen (§ 17). Wir müssen daher auch hier auf die vorhergehenden Untersuchungen kurz eingehen, da sie zu dem wichtigen Resultate geführt haben, daß die Kohle in den Kohlenfaden-Glühlampen und in der Bogenlampe nahe wie ein „grauer" Körper strahlt, und die Möglichkeit boten, aus der Flächenhelligkeit der Kohle auf ihre wahre Temperatur zu schließen.

a) Um die wahre Temperatur eines in einer Glühlampe leuchtenden Fadens experimentell zu bestimmen, bringt man denselben zum Verschwinden auf einem gleich temperierten Hohlraum aus der gleichen Substanz, aus welcher der Glühfaden gefertigt ist,

---

[1]) I. O. Lummer, „Neue Methode zur Beobachtung und Berechnung der wahren Temperatur des in einer Glühlampe elektrisch glühenden Fadens". Jahresber. d. Schles. Ges. f. Vaterl. Kultur 1913 (vorgetragen in der naturwissenschaftl. Sektionssitzung vom 28. Mai 1913).

II. O. Lummer, „Bestimmung des Gesamtstrahlungsgesetzes der Glühlampenkohle mit Hilfe der beobachteten wahren Temperatur des leuchtenden Kohlenfadens". Elektrot. Zeitschr., 34. Jahrg., Heft 50, 1913, S. 1428—1429 (vorgetragen in der Berliner Sitzung d. Deutsch. Beleuchtungstechn. Gesellschaft am 8. November 1913).

und dessen Temperatur man genau messen kann. Um diese Methode zu prüfen, ließ ich mir Glühlampen aus dünnen Platinfäden anfertigen und verwendete als Hohlraum den in Fig. 10 abgebildeten „Platinkasten“ nach Lummer-Kurlbaum[1]), dessen Temperatur durch ein in das Innere isoliert eingeführtes Le Chatelierscher Thermoelement gemessen wird.

Fig. 10.



Die Fäden S (Fig. 11) in den Platinglühlampen hatten eine U-förmige Gestalt. Bei der Messung bringt man die Lampe L nahe an den Platinkasten PP (Fig. 11) und reguliert entweder dessen Temperatur oder durch Änderung des Wattverbrauches die Temperatur des Platinfadens, bis bei Beobachtung mit bloßem Auge oder unter Benutzung eines schwach vergrößernden Fernrohres F der leuchtende Platinfaden sich von der leuchtenden äußeren Fläche des Platinkastens nicht mehr abhebt. Wegen der geringen Wand-

---

[1]) O. Lummer und F. Kurlbaum, „Über das Fortschreiten der photometrischen Helligkeit mit der Temperatur“. Verh. d. Deutsch. Phys. Ges. 2, 89—92 (1900).

stärke des Platinkastens (0,01 mm) kann man die im Moment der Einstellung abgelesene Temperatur des Hohlraumes gleich derjenigen der äußeren Fläche des Kastens und damit gleich derjenigen des auf dieser Fläche zum Verschwinden gebrachten Platinfadens setzen.

Außerdem habe ich eine Methode angegeben[1]), die wahre Temperatur des Platinfadens unter Zugrundelegung des Gesetzes für die Gesamtstrahlung des Platins zu berechnen, und zwar aus dem Wattverbrauch und der Größe der Oberfläche des leuchtenden Platinfadens.

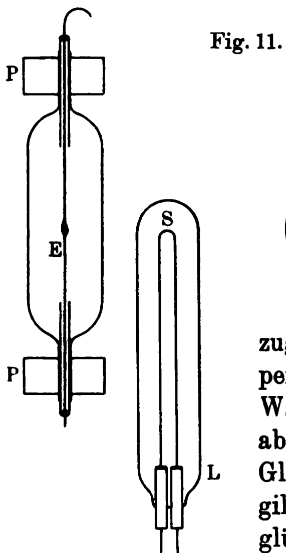


Fig. 11.

Nimmt man an, daß die dem Faden zugeführte elektrische Energie (Volt × Ampere) und die durch sie erzeugte Joulesche Wärme nur durch Ausstrahlung nach außen abgegeben wird, wie es bei gut evakuierten Glühlampen der Fall zu sein scheint, so gilt für die wahre Temperatur T^0 absolut des glühenden Platinfadens die Beziehung:

$$0{,}2388\, J . V = \mu . F . T^5 \quad . \; . \; . \; . \quad 1)$$

wo J die Ampere des Heizstromes, V die an den Enden des Glühfadens angelegte Spannung in Volt, F die gesamte Oberfläche des Glühfadens in Quadratzentimetern und μ eine Konstante ist.

Wie ich in meiner oben zitierten Abhandlung dargelegt habe, kann man die Konstante μ für blankes Platin aus den diesbezüglichen Strahlungsmessungen von Lummer-Kurlbaum und Lummer-Pringsheim sowohl als auch aus der Aschkinassschen Theorie[2]) der Metallstrahlung ermitteln. Wichtiger für die hier zu behandelnde Materie ist, daß der Wert von μ aus jeder einzelnen experimentellen Temperaturbestimmung des Platinfadens bei

---

[1]) Vgl. die Arbeit I in der Fußnote S. 39.

[2]) E. Aschkinass, „Die Wärmestrahlung der Metalle". Verh. d. Deutsch. Phys. Ges. 3, 251—254 (1905).

beliebiger Belastung mit Hilfe der obigen Beziehung zu berechnen ist. In der folgenden Tabelle I sind für die verschiedenen Glühzustände (Volt und Ampere) die experimentell gefundenen Werte der Temperatur, die aus Gleichung 1) berechneten Werte von μ und die mit dem Mittelwerte aller μ berechneten wahren Temperaturen angegeben.

Tabelle I.

Volt	Ampere	T^0 abs. beobachtet	$\mu \cdot 10^{12}$	T^0 abs. berechnet	T^0 ber. — T^0 beob.
2,105	0,3765	1268°	0,000 161	1281°	+ 13°
2,990	0,4835	1445	0,000 153	1445	± 0
3,670	0,5577	1554	0,000 151	1549	— 5
4,625	0,6535	1680	0,000 151	1675	— 5
5,460	0,7370	1781	0,000 150	1773	— 8
—	—	Mittelwert	0,000 153	—	—

Die gute Übereinstimmung zwischen den beobachteten und berechneten Werten der wahren Temperatur zeigt, daß man zur Berechnung der wahren Temperatur des Platinfadens einer Platinglühlampe die folgende Gleichung mit Erfolg benutzen darf:

$$0{,}2388\, J \cdot V = 0{,}000158 \cdot 10^{-12} \cdot F \cdot T^5 \quad . \; . \; . \; . \; . \quad 2)$$

wo die Buchstaben die gleiche Bedeutung haben wie in Gleichung 1).

b) Experimentelle Bestimmung der Temperatur des leuchtenden Kohlenfadens in den Glühlampen. Zur analogen Bestimmung der wahren Temperatur der Kohlenfäden in den Edison-Glühlampen ließ ich mir solche mit U-förmigen Kohlenfäden herstellen und benutzte den in Fig. 12 abgebildeten Apparat[1]), der im wesentlichen aus dem elektrisch zu heizenden Kohlenrohr k besteht, in welches das Le Chateliersche Thermoelement isoliert eingeführt ist.

Anfangs wurden zur Isolierung die bekannten Röhrchen aus „Marquardtscher Masse" benutzt, welche die Kgl. Porzellanmanufaktur in Berlin-Charlottenburg liefert. Schon bei relativ niedrigen Temperaturen aber scheinen diese Röhrchen sich mit der stark erhitzten Kohle nicht zu vertragen, jedenfalls erweisen

1) Für die kostenlose Anfertigung dieses Apparates bin ich der A.-E.-G. in Berlin, speziell Herrn Direktor Dr. May zu Dank verpflichtet.

sich die Röhrchen an einer Stelle durchgeschmolzen, so daß das Thermoelement unterbrochen und verletzt ist. Bewährt hat sich schließlich ein über das ganze Thermoelement gezogenes Röhrchen aus sogenanntem „Quarzglas“.


Fig. 12.



Um die Temperatur des glühenden Kohlenfadens zu messen, bringt man die mittlere hellste Stelle des U-förmig gebogenen Kohlenfadens der Glühlampe auf der äußeren Fläche des Kohlenrohres zum Verschwinden, indem man die elektrische Zufuhr im Kohlenfaden oder Kohlenrohr entsprechend ändert.

§ 13.

Gesamtstrahlungsgesetz der Glühlampenkohle.

Da für Kohle nicht wie beim blanken Platin das Gesetz der Gesamtstrahlung bekannt ist, kann man auch keine analoge Formel zur Berechnung der wahren Temperatur des glühenden Kohlenfadens aufstellen. Und doch erlauben die experimentell für jeden Glühzustand des Kohlenfadens gefundenen wahren Temperaturen, das Gesamtstrahlungsgesetz der Kohle zu ermitteln und aus ihm die wahre Temperatur des Glühfadens zu berechnen. Zum Verständnis der hierzu angewandten Methoden und der aus den erhaltenen Resultaten gefolgerten Schlüsse müssen wir etwas weiter ausholen.

a) Der absolut schwarze Körper. In seiner berühmt gewordenen Abhandlung „Über Emission und Absorption des Lichtes" definiert G. Kirchhoff[1]) den absolut schwarzen Körper als einen solchen, der alle auf ihn auffallende Strahlung vollkommen absorbiert, also Strahlen beliebiger Wellenlänge weder reflektiert noch hindurchläßt. Einen solchen Körper bzw. eine Fläche von solchen Eigenschaften kann es in der Natur nicht geben, da eine jede Substanz wohl gewisse Strahlensorten nahe vollkommen absorbieren kann, niemals aber Strahlen von jeder möglichen Wellenlänge. Die Verwirklichung dieses theoretischen schwarzen Körpers gelang W. Wien und O. Lummer[2]), und zwar mit beliebiger Annäherung an die Definition von Kirchhoff, auf indirektem Wege. Schon Kirchhoff hatte es ausgesprochen, daß im Inneren eines vollkommen geschlossenen Hohlraumes die „schwarze Strahlung" von der Temperatur des Hohlraumes herrscht, wenn dieser aus wärmeundurchlässigen Wänden von überall gleicher Temperatur gebildet wird. Macht man mit Wien und Lummer ein Loch in einen so beschaffenen Hohlraum, so dringt aus dieser

---

[1]) G. Kirchhoff, „Über den Zusammenhang zwischen Emission und Absorption von Licht und Wärme". Berl. Akad. Ber. 1859, 783—787. — „Über das Verhältnis zwischen Emissionsvermögen und Absorptionsvermögen der Körper für Wärme und Licht." Ann. d. Phys. u. Chem. **109**, 275—301 (1860).

[2]) W. Wien u. O. Lummer, „Methode zur Prüfung des Strahlungsgesetzes absolut schwarzer Körper". Ann. d. Phys. u. Chem. **56**, 451—456 (1895).

Öffnung die schwarze Strahlung nach außen, und zwar die schwarze Strahlung von der Temperatur des Hohlraumes. Seit dieser Zeit erst (1895) datieren die Strahlungsmessungen mit schwarzen Körpern, deren verschiedene Ausführungsformen wir übergehen wollen[1]). In Fig. 16, S. 58, ist bei K der sogenannte elektrisch geglühte schwarze Körper nach Lummer-Kurlbaum[2]) abgebildet.

b) Stefan-Boltzmannsches Gesetz. Noch vor der Verwirklichung der schwarzen Strahlung war von L. Boltzmann[3]) auf theoretischem Wege das Gesetz der Gesamtstrahlung des schwarzen Körpers hergeleitet worden, welches aussagt, daß die schwarze Gesamtstrahlung proportional zur vierten Potenz der absoluten Temperatur ansteigt. Wir nannten dies Gesetz das Stefan-Boltzmannsche Strahlungsgesetz, weil Stefan[4]) vor Boltzmann dieses Gesetz auf Grund aller damals vorhandenen Strahlungsarbeiten, wenn auch irrtümlicherweise, als gültig für alle Strahlungskörper aufgestellt hat.

Die allerersten Messungen über die Strahlung des schwarzen Körpers rühren von Lummer und Pringsheim[5]) her; sie zeigten, daß das Stefan-Boltzmannsche Gesetz tatsächlich von der schwarzen Strahlung befolgt wird. Die Abweichungen liegen innerhalb der Genauigkeit der Temperaturmessung der von Lummer-Pringsheim benutzten Hohlräume bzw. der Genauigkeit der thermoelektrischen Temperaturskala. In mathematischer Form lautet das Stefan-Boltzmannsche Gesetz:

$$\int_0^\infty S_\lambda d\lambda = \sigma . T^4 \quad \ldots \ldots \ldots \quad 3)$$

1) Siehe O. Lummer, „Die strahlende Energie (Optik)", Bd. II der 10. Aufl. von Müller-Pouillets „Lehrbuch der Physik".

2) O. Lummer u. F. Kurlbaum, „Der elektrisch geglühte schwarze Körper". Ann. d. Phys. **5**, 829—839 (1901).

3) L. Boltzmann, „Ableitung des Stefanschen Gesetzes, betr. die Abhängigkeit der Wärmestrahlung von der Temperatur usw.". Wied. Ann. **22**, 291—294 (1884).

4) J. Stefan, „Über die Beziehung zwischen der Wärmestrahlung und der Temperatur". Wien. Ber. (2) **79**, 391—428 (1879).

5) O. Lummer u. E. Pringsheim, „Die Strahlung eines schwarzen Körpers zwischen 100 und 1300° C". Wied. Ann. **63**, 395—410 (1897) u. Ann. d. Phys. **3**, 159—160 (1900).

wenn mit S_λ das Strahlungsvermögen des schwarzen Körpers für die Welle λ (genauer für den Wellenlängenbezirk $d\lambda$ zwischen den Wellen λ und $\lambda + d\lambda$), mit T die absolute Temperatur und mit σ die Strahlungskonstante des schwarzen Körpers bezeichnet wird. Nach den neueren Messungen kann als Mittelwert aller Bestimmungen [1]) von σ gesetzt werden:

$$\sigma = 1{,}38 . 10^{-12} \frac{\text{g-Kal.}}{\text{cm}^2 \text{sec}} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 4)$$

c) Strahlt die Glühlampenkohle wie ein schwarzer Körper? Um diese Frage zu beantworten, nahm ich zunächst an, daß die Kohle wie ein schwarzer Körper strahlt, also gemäß dem Stefan-Boltzmannschen Gesetze. Dann lautet die Beziehung zur Berechnung der experimentell bestimmten absoluten Temperatur T des glühenden Kohlenfadens:

$$0{,}2388 . J . V = 1{,}38 . 10^{-12} . F . T^4 \quad \ldots\ldots \quad 5)$$

wenn wiederum J die Stromstärke in Ampere, V die Spannung an den Enden des Glühfadens in Volt und F die gesamte Oberfläche in Quadratzentimetern des im absoluten Vakuum leuchtenden Fadens bedeuten. Der benutzte Kohlenfaden besaß eine Länge von 11,5 cm und eine Dicke von 0,0235 cm, also eine Oberfläche von $F = 0{,}849$ cm².

Die nach dieser Formel berechneten und die auf experimentellem Wege bei gewisser Belastung ($V . J$) beobachteten Temperaturen sind in der Tabelle II zusammengestellt. Aus ihr erkennt man, daß die berechneten Temperaturen viel zu niedrig sind. Aus dieser Tatsache muß geschlossen werden, daß die Glühlampenkohle nicht wie ein schwarzer Körper strahlt.

Tabelle II.

V	J	$T_{beob.}$	$T_{ber.}$	$T_{beob.-ber.}$	In Proz.
21,65	0,351	1309°	1116°	+ 193°	14,7
26,85	0,453	1471	1255	+ 216	14,7
27,50	0,465	1490	1271	+ 219	14,7
29,85	0,517	1565	1332	+ 233	14,8
31,50	0,551	1611	1371	+ 240	14,9
33,65	0,598	1680	1423	+ 257	15,3

[1]) Zusammengestellt in meiner Arbeit I der Fußnote S. 39.

d) Ermittelung der Strahlungskonstanten und des Gesamtstrahlungsgesetzes der Glühlampenkohle. Unter einem „grauen" Körper versteht man einen Temperaturstrahler, welcher für alle Wellenlängen im gleichen Verhältnis weniger strahlt als der schwarze Körper von gleicher Temperatur. Also muß ein grauer Körper ebenfalls das Stefan-Boltzmannsche Gesetz befolgen, nur daß jetzt die Strahlungskonstante σ des schwarzen Körpers durch eine andere, jedem grauen Körper eigentümliche Konstante μ zu ersetzen ist.

Aus der letzten Vertikalreihe der Tabelle II ersieht man, daß die Differenz zwischen den beobachteten und berechneten Werten der Temperatur des Kohlenfadens (unter der Annahme, daß dieser wie ein schwarzer Körper strahlt) prozentisch nahe gleich groß ist. Dies weist darauf hin, daß die Kohle der Glühlampen wie ein grauer Körper strahlt.

Ist dies tatsächlich der Fall, so müssen wir zur Berechnung der Glühtemperatur des Kohlenfadens die folgende Gleichung ansetzen:

$$0{,}2388 \,.\, V \,.\, J = \mu \,.\, F \,.\, T^4 \quad \ldots\ldots\ldots \quad 6)$$

wo μ die vorläufig noch unbekannte Strahlungskonstante der Kohle ist. Da wir aber durch das Experiment für jede Belastung $V.J$ die Temperatur T kennen, so können wir mit Hilfe der gemessenen Oberfläche F des Glühfadens aus jeder Bestimmung von T beim zugehörigen Glühzustand des Kohlenfadens einen Wert von μ berechnen.

In der folgenden Tabelle III sind die so berechneten Werte von $\mu . 10^{12}$ angegeben. Da die Unterschiede zwischen diesen Einzelwerten relativ gering sind, so kann man unter Benutzung des Mittelwertes sämtlicher Einzelwerte von μ aus Gleichung 6) die Temperatur für jeden Glühzustand (Wattverbrauch) berechnen, für welchen die Temperatur beobachtet worden war. Die so berechneten Temperaturen ($T_{\text{ber.}}$) sind in Tabelle III zugleich mit den beobachteten Temperaturen ($T_{\text{beob.}}$) mitgeteilt.

Die überraschend gute Übereinstimmung zwischen Beobachtung und Berechnung zeigt, daß das Gesamtstrahlungsgesetz der Glühlampenkohle tatsächlich durch die Beziehung 6) mit der Strahlungskonstanten μ aus Tabelle III dargestellt wird.

Demnach ist wohl kein Zweifel, daß die Kohle der Glühlampen als grauer Körper angesprochen werden darf,

Tabelle III.

V	J	$\mu \cdot 10^{12}$	$T_{\text{beob.}}$	$T_{\text{ber.}}$	$T_{\text{beob.}} - T_{\text{ber.}}$
21,65	0,351	0,728	1309°	1310°	— 1°
21,85	0,353	0,737	1310	1315	— 5
26,85	0,453	0,731	1471	1474	— 3
26,90	0,454	0,724	1476	1475	+ 1
27,50	0,465	0,730	1490	1492	— 2
27,20	0,459	0,728	1482	1484	— 2
29,85	0,517	0,724	1565	1564	+ 1
31,50	0,551	0,725	1611	1611	± 0
33,60	0,597	0,710	1679	1670	+ 9
33,65	0,598	0,711	1680	1672	+ 8
Mittelwert . . .		0,725	—	—	—

wenigstens in dem Temperaturintervall, auf welches sich die Tabelle bezieht, und für den Wellenlängenbereich, innerhalb dessen die Gesamtstrahlung ihre maximale Wirkung äußert.

§ 14.

Beziehung zwischen Flächenhelligkeit und Temperatur der Glühlampenkohle.

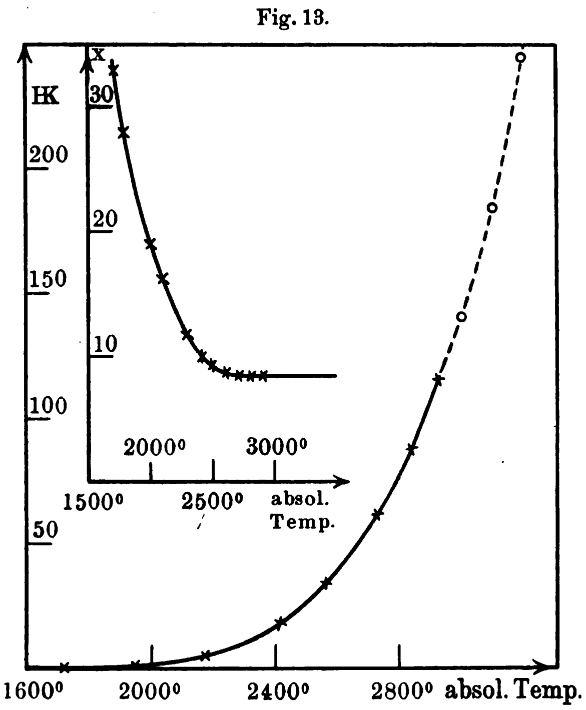
Die Kenntnis einer solchen Beziehung ist vor allem für unsere späteren Untersuchungen (vgl. D. dieses Kap.) von großem Wert. Ihre Ermittelung an der Kohle in den Kohlenfadenlampen ist nach dem Vorausgegangenen relativ leicht. Man mißt bei den verschiedenen Glühzuständen des Kohlenfadens die Kerzenstärke mittels des Lummer-Brodhunschen Photometers[1]) und berechnet aus der elektrischen Energie und der Oberfläche des Fadens gemäß Formel 6) die zu jedem Glühzustande gehörige wahre Temperatur des Glühfadens. Die so gefundenen zusammengehörigen Wertepaare sind in Fig. 13 in Gestalt einer Kurve mitgeteilt, und zwar in der größeren Kurve. Dabei bedeuten die Abszissen die absoluten Temperaturen und die Ordinaten die zugehörigen Lichtstärken in Hefnerkerzen (HK). Die Beobachtungspunkte sind durch ein Kreuz (×) markiert. Man sieht, daß man

[1]) O. Lummer u. E. Brodhun, „Ersatz des Photometerfettflecks durch eine rein optische Vorrichtung". Zeitschr. f. Instrkde. 9, 23—25 (1889).

hierbei bis zu Temperaturen von über 2900° abs. vorgedrungen ist. Bei einiger Übung im Photometrieren gelingt es leicht, bei so hoher Überhitzung des Kohlenfadens so schnell zu messen, daß die Verdampfung des Kohlenfadens keinen merklichen Fehler verursacht, d. h. daß eine auf- und eine absteigende Reihe miteinander übereinstimmen.

Diese größere Kurve in Fig. 13 kann aber auch als die Beziehung zwischen der absoluten Temperatur und der Flächen-

Fig. 13.



helligkeit der Kohle angesehen werden. Erstens glüht, zumal bei den uns interessierenden hohen Temperaturen, fast der ganze U-förmige Kohlenfaden ziemlich gleich hell; außerdem wurden bei den Messungen die an den Zuleitungsdrähten sitzenden unteren Enden des U-förmigen Fadens abgeblendet, so daß nur der gleichmäßig glühende Faden Licht zum Photometer sandte.

Die kleinere Kurve in Fig. 13 gibt das in der größeren Kurve enthaltene Beobachtungsmaterial noch einmal in anderer Weise wieder. Es ist die gleiche Darstellung, welche Lummer und

Kurlbaum[1]) wählten, um das Steigen der Flächenhelligkeit des blanken Platins mit der Temperatur deutlich und plastisch hervortreten zu lassen. Es wurde mit obigen Autoren die folgende Gleichung angesetzt:

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^x \quad \text{7)}$$

wo H_1 bzw. H_2 die Flächenhelligkeit des Glühfadens bei der absoluten Temperatur T_1 bzw. T_2 bedeutet und x die Potenz angibt, nach welcher die Helligkeit der Flächeneinheit mit der absoluten Temperatur fortschreitet. Natürlich muß x von Etappe zu Etappe berechnet werden, da obige Gleichung stets nur für zwei sehr nahe benachbarte Temperaturen T_1 und T_2 gültig sein kann.

In der folgenden Tabelle sind die laut obiger Formel berechneten Werte von x für die zugehörigen Temperaturen T mitgeteilt.

Tabelle IV.

Absol. Temp.	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700	2800	2900
x	33	28	22,5	19	16,2	14	12	10	9,3	8,8	8,5	8,5	8,5

Die zueinander gehörigen Werte von T und x sind in der kleineren Kurve der Fig. 13 eingezeichnet. Man erkennt aus ihr, daß mit steigender Temperatur der Wert von x schnell abnimmt, um schließlich (etwa bei 2700° abs.) einen konstanten Wert $x = 8{,}5$ anzunehmen. Es braucht nicht hervorgehoben zu werden, daß dieser Wert nur gilt, soweit die Experimente ihn stützen. Gleichwohl wollen wir unter der Annahme, daß auch bei noch höheren Temperaturen $x = 8{,}5$ sei, mit Hilfe dieses Wertes die größere Kurve extrapolieren. Die so ermittelten Helligkeiten sind in dieser Kurve durch Kreise ⊙ markiert. Die durch diese extrapolierten Punkte gezogene Kurve ist „gestrichelt" gezeichnet. Wir werden von diesen Resultaten Gebrauch machen, um auch beim Krater der Bogenlampe aus der Flächenhelligkeit auf seine wahre Temperatur zu schließen. Ich glaube, daß wir keinen allzu großen Fehler begehen, wenn wir auch bei der hohen Temperatur der Kohle in der Bogenlampe die Potenz $x = 8{,}5$ noch als richtig annehmen.

---

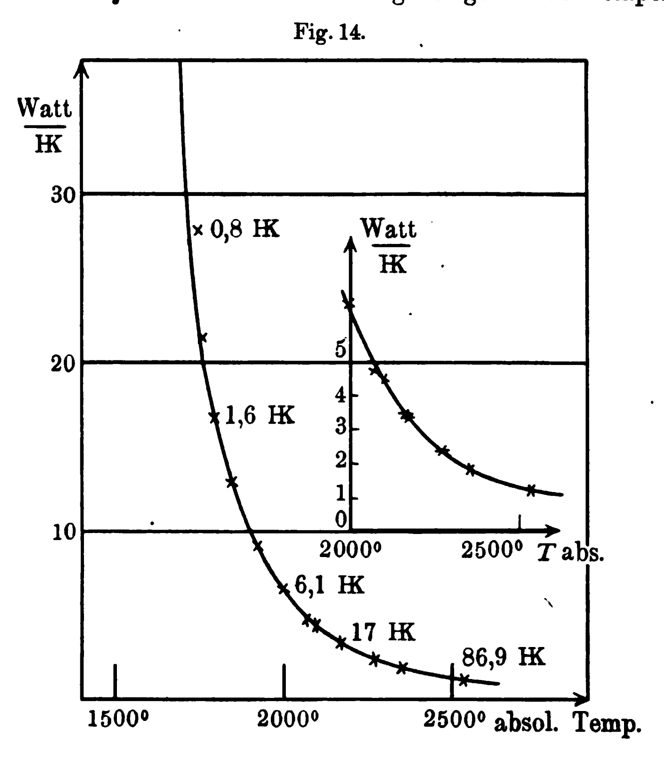
[1]) O. Lummer u. F. Kurlbaum, a. a. O.

§ 15.

Beziehung zwischen Temperatur und Energieverbrauch des leuchtenden Kohlenfadens.

Um diese Beziehung zu finden, braucht man bei den verschiedenen Glühzuständen des Kohlenfadens nur die gesamte Lichtstärke und den Wattverbrauch zu messen und gemäß Formel 6) wieder die zu jedem Glühzustande zugehörige wahre Temperatur

Fig. 14.



des Glühfadens zu berechnen. Die so erhaltenen Resultate sind in Fig. 14 ebenfalls in Gestalt von Kurven wiedergegeben. Als Abszissen sind die absoluten Temperaturen, als Ordinaten die zugehörigen Watts pro Hefnerkerze aufgetragen. Das für die Leuchttechnik besonders wichtige Gebiet von 1 bis 7 Watt pro Hefnerkerze ist in der kleineren Kurve noch einmal in vergrößertem Maßstabe dargestellt worden.

Aus dieser kleineren Kurve sind zur besseren Übersicht die in Tabelle V zusammengestellten Zahlen abgelesen worden. Man sieht, wie schnell die Ökonomie der Kohlenfadenlampe steigt, wenn die Temperatur des Kohlenfadens nur um relativ wenig erhöht wird.

Tabelle V.

HK	Watt / HK	Absol. Temperatur Grad	HK	Watt / HK	Absol. Temperatur Grad
3,0	10,8	1884	15,2	3,6	2150
3,4	9,6	1909	18,1	3,2	2182
4,0	8,8	1929	22,1	2,8	2222
4,7	8,0	1951	27,8	2,4	2268
5,4	7,2	1974	36,6	2,0	2323
6,4	6,4	2004	52,2	1,6	2401
8,1	5,6	2039	89,2	1,2	2546
10,2	4,8	2079	—	1,0	2700
13,0	4,0	2123			

§ 16.

Indirekter Beweis aus älteren Versuchen, daß die Kohle der Glühlampen wie ein grauer Körper strahlt.

Die vor vielen Jahren von Lummer und Pringsheim[1]) angestellten Untersuchungen über die Glühlampe mit Kohlenfäden (andere gab es damals noch nicht) bestätigen meines Erachtens das von mir gefundene Resultat, daß die Glühlampenkohle nicht wie ein schwarzer, sondern nahezu wie ein grauer Körper strahlt.

Aus Energiemessungen im Spektrum des schwarzen Körpers fanden Lummer-Pringsheim[2]) die Beziehung:

$$\lambda_m \cdot T = 2940 \qquad 8)$$

und für blankes Platin innerhalb eines weiten Temperaturintervalls die Beziehung:

$$\lambda_m \cdot T = 2630 \qquad 9)$$

[1]) O. Lummer u. E. Pringsheim, „Temperaturbestimmung hocherhitzter Körper (Glühlampen usw.) auf bolometrischem und photometrischem Wege". Verh. d. Deutsch. Phys. Ges. 3, 36—42 (1901).

[2]) Dieselben, ebenda, S. 36.

wo in beiden Gleichungen λ_m die in $\mu = 0{,}001$ mm gemessene Wellenlänge bedeutet, bei welcher im Normalspektrum des schwarzen Körpers bzw. des blanken Platins von der absoluten Temperatur T das Energiemaximum gelegen ist.

Es sei erwähnt, daß es noch vor Verwirklichung der schwarzen Strahlung W. Wien [1]) gelang, auf theoretischem Wege durch Anwendung des Dopplerschen Prinzips auf die an einem bewegten Spiegel reflektierte Strahlung die Beziehung $\lambda_m . T = const$ als nur für die schwarze Strahlung gültig herzuleiten, welches Resultat oft auch als „Wiensches Verschiebungsgesetz“ bezeichnet wird und sich glänzend bestätigt und bewährt hat.

Durch die beiden Beziehungen 8 und 9 war ein Mittel gewonnen, um die wahre Temperatur aller Temperaturstrahler, deren Strahlungseigenschaften zwischen denen des schwarzen Körpers und des blanken Platins liegen, zwischen zwei Grenzen einzuschließen. Lummer-Pringsheim [2]) benutzten als erste diese Methode, um die Temperaturgrenzen des Bogenlampenkraters des Kohlenfadens der Glühlampe usw. festzulegen, indem sie von diesen Strahlungskörpern die Lage von λ_m im Normalspektrum bestimmten. Uns interessiert hier nur die Temperaturbestimmung einer normal gebrannten Kohlenfaden-Glühlampe, für welche sie $\lambda_m = 1{,}4\,\mu$ fanden.

Je nachdem man annimmt, daß die Kohle wie ein schwarzer Körper oder wie blankes Platin strahlt, erhält man eine obere und eine untere Grenze für die wahre Temperatur des Kohlenfadens (T_{max} und T_{min}), und zwar muß gelten:

$$T_{max} = \frac{2940}{\lambda_m} = \frac{2940}{1{,}4} = 2100^0 \text{ abs.}$$

$$T_{min} = \frac{2630}{\lambda_m} = \frac{2630}{1{,}4} = 1880^0 \text{ abs.}$$

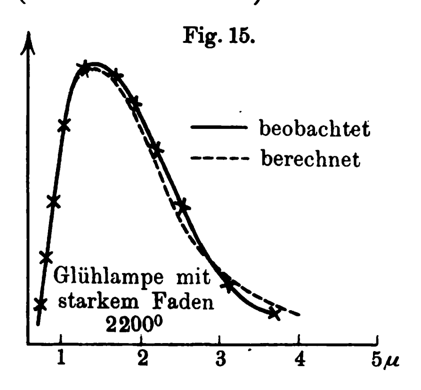
Strahlt die Kohle tatsächlich wie ein grauer Körper, so gilt für sie ganz streng die Beziehung $\lambda_m . T = 2940$ der schwarzen Strahlung und die wahre Temperatur des von Lummer und Pringsheim untersuchten Glühfadens war $T = 2100^0$ abs. Leider

---

[1]) W. Wien, „Eine neue Beziehung der Strahlung schwarzer Körper zum zweiten Hauptsatze der Wärmetheorie“. Ber. d. Berl. Akademie 1893, S. 55—62.

[2]) O. Lummer u. E. Pringsheim, a. a. O., S. 37.

haben wir damals nicht die Watts gemessen, welche die Glühlampe speisten. Es ist aber gesagt, daß die Angaben sich auf „normale Glühzustände" beziehen. In anderen Worten dürfte das heißen, daß die benutzte Energie die damals pro Kerze gebräuchliche Wattzahl war, welche jedenfalls zwischen 3,5 und 4 Watt pro Kerze gelegen war. Für einen solchen Wattverbrauch liefert unsere Tabelle V auf S. 52 die wahren Temperaturen von 2160 bis 2123° abs. Übrigens lehrt jene Tabelle, daß die Temperatur sich mit dem Wattverbrauch gerade in dieser Gegend relativ wenig ändert. Ich glaube also aus der überraschenden Übereinstimmung der aus $\lambda_m . T = 2940$ berechneten Temperatur (2100° abs.) mit der gemäß Tabelle V ermittelten Temperatur (2123 bis 2160° abs.) schließen zu müssen, daß unsere damaligen Versuche mein Resultat bestätigen, wonach die Glühlampenkohle wie ein grauer Körper strahlt. Denn nach meinen im § 13 mitgeteilten Messungen ist die andere Alternative ausgeschlossen, daß Kohle wie ein schwarzer Körper strahlt. Ebenso ist nach dem eben Dargelegten ausgeschlossen, daß die Kohle wie blankes Platin strahlt, da in diesem Falle der Glühfaden der damals untersuchten Glühlampe die Temperatur von nur 1880° abs. besessen hätte und der Faden laut Tabelle V, S. 52 über 10 Watt pro Kerze gebraucht hätte.



Mit dem Resultat, daß die Glühlampenkohle nahe wie ein grauer Körper strahlt, verträgt sich auch das folgende von Lummer-Pringsheim für eine starkfadige Glühlampe publizierte Material, welches in Fig. 15 in Gestalt von Energiekurven niedergelegt ist. Wie man sieht, decken sich die beobachtete und berechnete[1]) Energiekurve, welche für die aus $\lambda_m T = 2940$ sich ergebende Temperatur des Glühfadens der benutzten starkfadigen Glühlampe

[1]) Nach der W. Wienschen für das sichtbare Gebiet streng gültigen Spektralgleichung berechnet, welche auch noch für Gebiete gilt, für welche das Produkt aus Wellenlänge und Temperatur < 3000 ist.

von 2200° abs. berechnet worden ist, so gut wie vollkommen. Da, wo die beobachtete Kurve unter die berechnete herabsinkt, setzt gerade die Glasabsorption der Glühbirne ein, welche bei $3\,\mu$ schon beträchtlich ist.

Übrigens könnte auch die Temperaturbestimmung dieser starkfadigen Lampe noch herangezogen werden. Laut Tabelle V, S. 52 müßte dieser mehrere Millimeter starke Kohlenfaden mit etwa 3 Watt pro Kerze belastet gewesen sein, was durchaus wahrscheinlich ist.

Da meine direkten Beweise für die „grauen“ Strahlungseigenschaften der Kohle nur bis zur Temperatur von 1700° abs. reichen, so glaubte ich jene älteren Versuche heranziehen zu müssen, da sie indirekt zu erweisen imstande sind, daß die Glühlampenkohle noch bis zu Temperaturen von 2100° abs. wie ein grauer Körper strahlt.

§ 17.

Die Bogenlampenkohle ein „grauer“ Körper (wahre und schwarze Temperatur des positiven Kraters beim Normaldruck).

Aus folgenden Gründen ist es wichtig zu wissen, ob auch die Kohle der Bogenlampen wie ein grauer Körper strahlt. Die Ermittelung der Strahlungseigenschaft der Bogenlampenkohle hat zunächst ein hervorragendes wissenschaftliches Interesse. Da wir kennen gelernt haben, daß die Normaltemperatur der Bogenlampe konstant ist (§ 10), so eignet sie sich als einigermaßen konstante Strahlungsquelle. Wüßten wir außerdem, daß die Bogenlampenkohle wie ein grauer Körper strahlt, so könnten wir aus der Lage λ_m des Energiemaximums im Normalspektrum des positiven Kraterlichtes die wahre Größe der Normaltemperatur berechnen und hätten dann alles, um die Energieverteilung der schwarzen Strahlung bei dieser Normaltemperatur zu ermitteln und die Spektralgleichung von M. Planck[1]) auf ihre Gültigkeit zu prüfen. Aus diesen Gründen ließ ich Versuche anstellen, welche

[1]) M. Planck, „Über eine Verbesserung der Wienschen Spektralgleichung“. Verh. d. Deutsch. Phys. Ges. 2, 202—204 (1900). — „Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum.“ Ebenda, S. 237—245 und Ann. d. Phys. 4, 553—566 (1901).

diese Frage entscheiden sollten, und suchte gleichzeitig nach neuen Methoden, um die wahre Größe der Normaltemperatur zu bestimmen.

Zum Verständnis dieser Untersuchungen müssen wir auch hier weiter ausholen und eine Temperaturbestimmung genauer besprechen, auf welche am Schluß einer Abhandlung von Lummer-Pringsheim [1]) hingewiesen ist. Diese enthält die für sichtbare Wellen nach dem Vorgange von Paschen-Wanner [2]) bzw. Wanner [3]) ermittelten sogenannten „isochromatischen Kurven“ der schwarzen Strahlung, welche aussagen, wie die Energie einer Wellenlänge mit der Temperatur ansteigt. Trägt man wie in Fig. 20, S. 64 als Abszissen die reziproken Werte der absoluten Temperaturen ($1/T$) und als Ordinaten die Logarithmen der zugehörigen Helligkeiten ($log\,E$) der untersuchten sichtbaren Welle (λ) auf, so muß diese „logarithmische Isochromate“ gemäß der schwarzen Spektralgleichung geradlinig verlaufen, falls man als Strahlungskörper den schwarzen Körper verwendet; dabei ist es gleichgültig, welcher Vergleichslichtquelle man sich bedient. Als solche benutzten Lummer-Pringsheim eine starkfadige Kohlenglühlampe. Dabei ergab sich das interessante Resultat, daß die für die sichtbaren Wellen bestimmten „logarithmischen Isochromaten“ sich bei genügender Verlängerung in einem Punkte schnitten. Dies muß so sein, wenn die Vergleichslichtquelle entweder wie ein „schwarzer“ oder wie ein „grauer“ Körper strahlt. Dann aber kann man aus der Lage dieses Schnittpunktes direkt die wahre Temperatur der Vergleichslichtquelle ermitteln, indem das von ihm auf die Abszissenachse gefällte Lot den reziproken Wert ($1/T$) dieser Temperatur abzulesen gestattet.

Da wir heute wissen, daß der Kohlenfaden einer Glühlampe wie ein grauer Körper strahlt, so habe ich aus den Lummer-Pringsheimschen logarithmischen Isochromaten die Temperatur der damals benutzten starkfadigen Glühlampe durch Fällen jenes Lotes vom Schnittpunkt berechnet. Danach müßte dieser leuch-

---

[1]) O. Lummer u. E. Pringsheim, a. a. O., S. 46.

[2]) F. Paschen u. H. Wanner, „Eine photometrische Methode zur Bestimmung der Exponentialkonstanten der Emissionsfunktion“. Berl. Akad. Ber. (2) **108**, 5—11 (1899).

[3]) H. Wanner, „Photometrische Messungen der Strahlung schwarzer Körper“. Ann. d. Phys. **2**, 141—157 (1900).

tende Kohlenfaden der normal gebrannten Glühlampe die wahre Temperatur von 2080° abs. besessen haben, welcher Wert gemäß unserer Tabelle V auf S. 52 dem Leuchtfaden einer Glühlampe bei normalem Wattverbrauch tatsächlich zukommt.

Ich erinnerte mich jener von uns damals nur mit ein paar Worten gestreiften Methode, als ich die Frage beantwortet wissen wollte, ob auch die Bogenlampe wie ein grauer Körper strahlt[1]). Sollte dies der Fall sein, dann mußten sich die logarithmischen Isochromaten des schwarzen Körpers auch in einem Punkte schneiden, falls man den positiven Krater der Bogenlampe als Vergleichslichtquelle benutzte. War dieses der Fall, dann konnte man zum ersten Male mit Hilfe des Schnittpunktes der logarithmischen Isochromaten auch die wahre Temperatur des positiven Kraters, und zwar mit relativ großer Genauigkeit bestimmen. Bisher hatte man nur die „schwarze" Temperatur des Kraters exakt ermitteln (§ 6) bzw. seine wahre Temperatur nach Lummer-Pringsheim nur innerhalb weiter Grenzen einschließen können. Ehe wir die Resultate dieser erst kürzlich publizierten[2]) Versuche mitteilen, werde die dabei verwendete Versuchsanordnung beschrieben.

Versuchsanordnung. Diese etwas komplizierte Versuchsanordnung ist in Fig. 16 abgebildet, und zwar im Falle, daß die Bogenlampe als Vergleichslichtquelle dient.

Den Hauptteil des Aufbaues bildet das Lummer-Brodhunsche Spektralphotometer *Sp* mit dem Lummer-Brodhunschen Kontrastwürfel[3]), welcher das Licht der beiden Kollimatorrohre r_1 und r_2 aufnimmt. Vor dem Spalt des Rohres r_1 steht die Öffnung des schwarzen Körpers K, während der Spalt des Rohres r_2 sein Licht vom Krater der Bogenlampe L empfängt. Beide meßbar veränderliche Spalte sind von Mattscheiben bedeckt. Zwischen dem Spalt des Rohres r_1 und der strahlenden Öffnung des

---

[1]) Denn daß die Kohle wie ein schwarzer Körper strahlt, ist wegen des Reflexionsvermögens und auf Grund der Resultate an den Kohlenfäden auszuschließen.

[2]) Vorgetragen in der naturwissenschaftlichen Sektion d. Schles. Ges. f. Vaterl. Kultur am 6. Mai 1914.

[3]) O. Lummer und E. Brodhun, „Lichtmessung durch Schätzung gleicher Helligkeitsunterschiede (Kontrastphotometer)". Zeitschr. f. Instrkde. 9, 461—465 (1889).

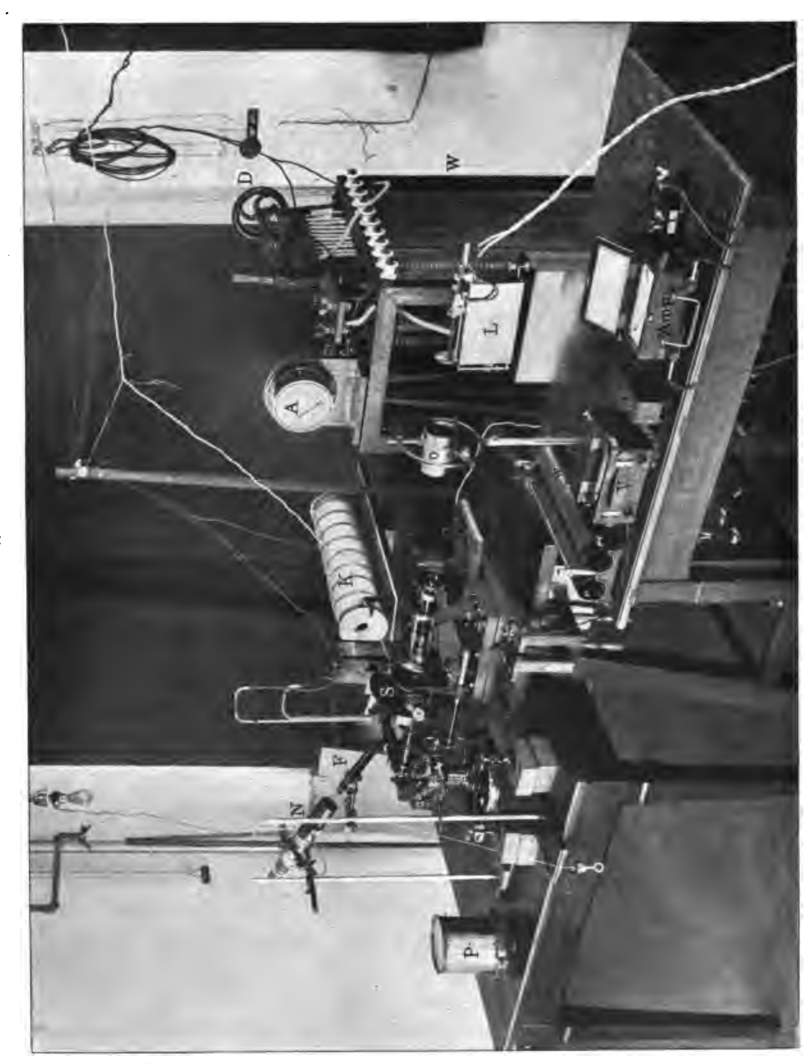


Fig. 16.

schwarzen Körpers ist eine wassergespülte Klappe k eingefügt, um den Spalt bzw. die ihn bedeckende Mattscheibe gegen die starke Strahlung zu schützen. Zur Regulierung des Heizstromes des schwarzen Körpers dient der über 100 Amp. aushaltende Regulierwiderstand W, zur Konstanthaltung des Stromes das Amperemeter A. Zur Messung der Temperatur des schwarzen Hohlraumes bzw. der Millivolt des isoliert eingeführten Le Chatelierschen Thermoelementes wurde das Pyrometer P benutzt, welches vorher genau geeicht worden war.

In das Innere des Kollimatorrohres r_2 kurz vor dem zugehörigen Meßspalt ragt die Sektorscheibe des Lummer-Brodhunschen[1]) rotierenden Sektors S mit der Brodhunschen Einrichtung[2]) zur Ablesung der Sektoröffnung während der Rotation. Zur Ablesung des Sektors dient das Fernrohr F, zur Beleuchtung der Sektorteilung die Beleuchtungsvorrichtung N. Wegen der Einzelheiten bei der photometrischen Vergleichung und Einstellung bzw. der Lichtschwächung mittels geeichter Rauchgläser sei auf die Abhandlung von Lummer-Pringsheim[3]) verwiesen, da diese hier als Vorbild diente.

Um vom positiven Krater nur Stellen zur Beleuchtung des Spaltes bzw. der Mattscheibe des Rohres r_2 beitragen zu lassen, welche eine konstante maximale Helligkeit besitzen, wurde durch das Objektiv o vom Krater L der horizontalen positiven Kohle ein vergrößertes deutliches Bild auf der Spaltebene bzw. Mattscheibe des Rohres r_2 entworfen. Gleichzeitig wurde dadurch die Flächenhelligkeit des Kraters genügend verringert. Während ein Beobachter die photometrische Einstellung bewirkte, ein zweiter die Spaltbreiten, die Öffnung des rotierenden Sektors usw. ablas, regulierte ein dritter Beobachter die Bogenlampe bzw. die Lage des Kraterbildes so, daß eben stets die hellste Stelle des Kraters zur Wirkung kam.

Die Instrumente A und V sind genaue Milliampere- und Millivoltmeter, welche bei Benutzung von Glühlampen als strahlen-

---

[1]) O. Lummer u. E. Brodhun, „Photometrische Untersuchungen (Verwendung des Talbotschen Gesetzes in der Photometrie)". Zeitschr. f. Instrumentenkunde **16**, 300—307 (1896).

[2]) E. Brodhun, „Vorrichtung zum Ablesen einer rotierenden Teilung". Ebenda **17**, 10—14 (1897).

[3]) A. a. O.

der Körper bzw. als Vergleichslichtquelle zur genauen Wattbestimmung der elektrischen Energie dienten; w ist ein kleiner Regulierwiderstand, durch welchen der gewünschte Glühzustand der Glühlampen hergestellt wurde.

Versuchsergebnisse. Die oben ausgeführten Perspektiven erhalten ihre experimentelle Beweiskraft erst dann, wenn durch Versuche festgestellt ist, daß sich die logarithmischen Isochromaten des schwarzen Körpers nicht in einem Punkt schneiden, falls man als Vergleichslicht eine selektiv strahlende Quelle, wie z. B. eine Platinglühlampe, benutzt. Dies ist, wie Fig. 17 zeigt, tatsächlich der Fall.

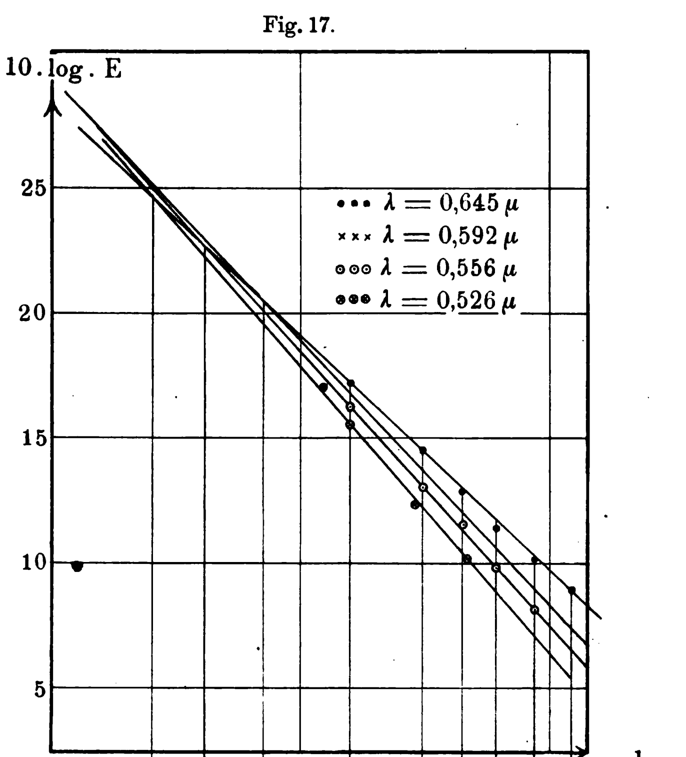
Sollten in diesem Falle die Schnittpunkte benachbarter logarithmischer Isochromaten relativ weit auseinanderliegen, dann erst liefert der einheitliche Schnittpunkt der logarithmischen Isochromaten bei Benutzung eines schwarzen oder grauen Körpers eine genaue Ermittelung seiner wahren Temperatur.

Vor Mitteilung der Ergebnisse sei noch folgendes vorausgeschickt:

Da das Arbeiten mit dem schwarzen Körper als Strahlungsquelle zeitraubend und kostspielig ist, so wurden die logarithmischen Isochromaten in Fig. 17 bis 19 unter Benutzung einer Kohlenfaden-Glühlampe als strahlender Lichtquelle bestimmt. Dabei wurde eine Kohlenfaden-Glühlampe mit U-förmigem Faden verwendet. Bei dieser wurden die Watts etappenweise erhöht, jedesmal die Helligkeit für die vier benutzten Wellenlängen λ bestimmt und aus den genau abgelesenen Watts die wahre Temperatur des Kohlenfadens bei jeder Etappe berechnet (§ 13). Strahlt die Kohle der Glühfäden wie ein grauer Körper (§ 13), so müssen auch die ihnen zugehörigen logarithmischen Isochromaten laut Theorie geradlinig verlaufen und sich bei Verwendung eines schwarzen oder grauen Körpers als Vergleichslichtquelle ebenfalls in einem Punkte schneiden, aus welchem deren wahre Temperatur zu erschließen ist. Dies ist tatsächlich der Fall. Dann aber haben diese „grauen“ logarithmischen Isochromaten vor den „schwarzen“ den Vorzug voraus, daß sie experimentell bis zu einer höheren Temperatur („Zerspratzungstemperatur“ der Kohlenfäden von etwa 3000° abs.) zu bestimmen sind als diejenigen der schwarzen Strahlung, da der schwarze Körper sicher nicht über den Schmelzpunkt der Lotstelle des Thermoelementes zu erhitzen ist.

a) Platinfaden der Platinglühlampe als Vergleichslichtquelle und graue Isochromaten (Fig. 17). Wie die Fig. 17 deutlich erkennen läßt, schneiden sich immer nur je zwei benachbarte logarithmische Isochromaten in je einem Punkt, so daß wir bei vier gemessenen Isochromaten also drei Schnittpunkte erhalten. Durch Fällen der drei Lote von diesen Schnitt-

Fig. 17.

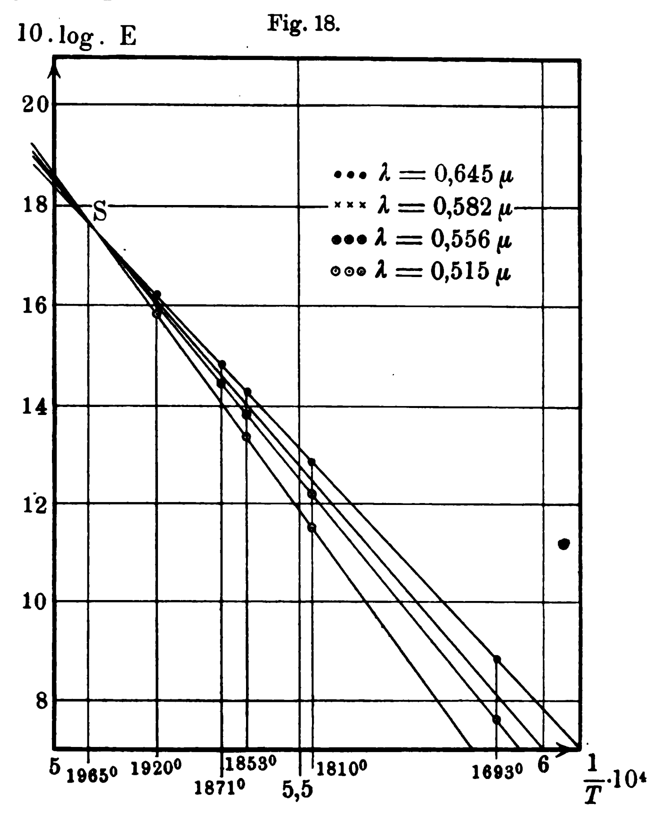


punkten ergeben sich die drei Temperaturen: 1710, 1776 und 1852⁰ abs., während die aus den Watts berechnete Temperatur (§ 12) der Platinlampe rund 1755⁰ abs. beträgt, also dem Mittelwert 1779⁰ abs. jener drei Temperaturen nahekommt.

b) Kohlenfaden als Vergleichslichtquelle und graue Isochromaten (Fig. 18). Aus der Figur lassen sich die folgenden Schlüsse und Resultate direkt ersehen bzw. ermitteln: Die Glühlampenkohle gibt wie der schwarze Körper geradlinig verlaufende

logarithmische Isochromaten. Diese Isochromaten für die untersuchten sichtbaren Wellen schneiden sich alle in einem Punkt, wiederum ein Beweis, daß die Glühlampenkohle wie ein grauer Körper strahlt. Das vom Schnittpunkt der Isochromaten gefällte Lot schneidet die $1/T$-Achse an der Stelle $1/T \cdot 10^4 = 5{,}08$, woraus sich die wahre Temperatur des Kohlenfadens der Vergleichsglühlampe zu $T = 1965^0$ abs. ergibt, während die aus

Fig. 18.



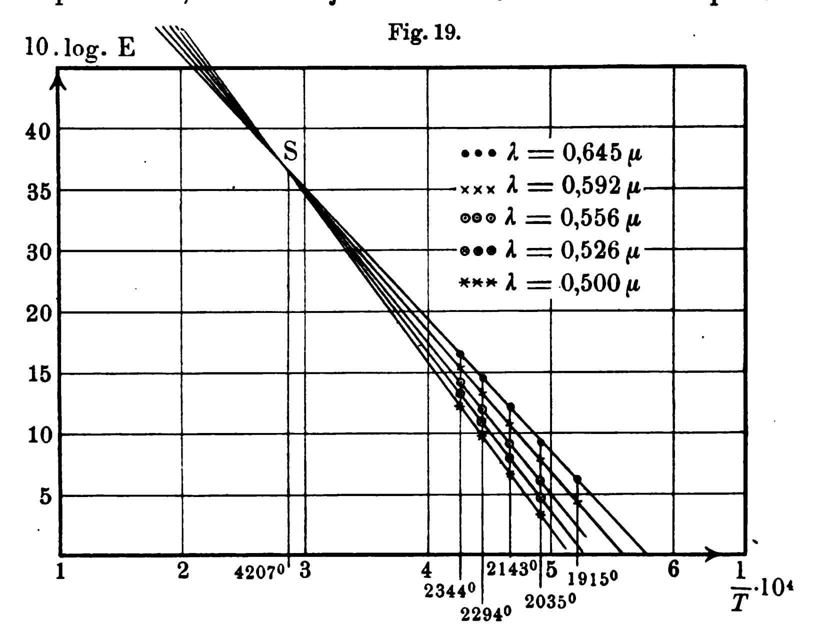
den Watts laut Formel 6) auf S. 47 berechnete Temperatur $T = 1951^0$ abs. ist. Bei einer zweiten solchen Versuchsreihe ergab der Schnittpunkt die Temperatur 2127^0 abs., die Berechnung aus den Watts 2104^0 abs. Eine bessere Übereinstimmung konnte wohl kaum erwartet werden.

Durch diese Messungen der Kohlenfaden-Isochromaten scheint mir schon jetzt der Schluß berechtigt, daß durch sie das Gebiet

der Gültigkeit der Planckschen bzw. W. Wienschen Spektralgleichung im sichtbaren Spektrum um über 1000° erweitert worden ist. Erst weitere ausführlichere Versuchsreihen müssen freilich die volle Beweiskraft dieses Schlusses erhärten[1]).

c) Bogenlampe als Vergleichslichtquelle und sowohl schwarze als graue Isochromaten. Wahre Temperatur des positiven Kraters. Durch die bisherigen Resultate war die Grundlage geschaffen, um der Frage die Antwort zu finden, ob auch die Kohle der Bogenlampe wie ein grauer Körper strahlt, bzw. im bejahenden Falle die wahre Temperatur

Fig. 19.



des positiven Kraters der in freier Luft brennenden Bogenlampe zu ermitteln. Dazu braucht man nur die logarithmischen Isochromaten des schwarzen Körpers bzw. des Kohlenfadens der Glühlampe unter Benutzung des Bogenlampenkraters als Vergleichslichtquelle zu messen. In Fig. 19 sind die so

[1]) Mit diesen Versuchen ist Frl. Benedict zurzeit schon beschäftigt, welche auch alle hier mitgeteilten Versuche, zum Teil unter Assistenz von Herrn Teuchert, ausgeführt hat. Es sei ihr auch an dieser Stelle mein Dank ausgesprochen.

gefundenen grauen, in Fig. 20 die schwarzen Isochromaten reproduziert. In beiden Figuren schneiden sich die logarithmischen Isochromaten in einem Punkt: also strahlt auch die Kohle der Bogenlampe wie ein grauer Körper, wenigstens im Gebiet der sichtbaren Wellen. Ferner ergibt sich aus dem Schnittpunkt S durch Fällen des Lotes die wahre Temperatur des

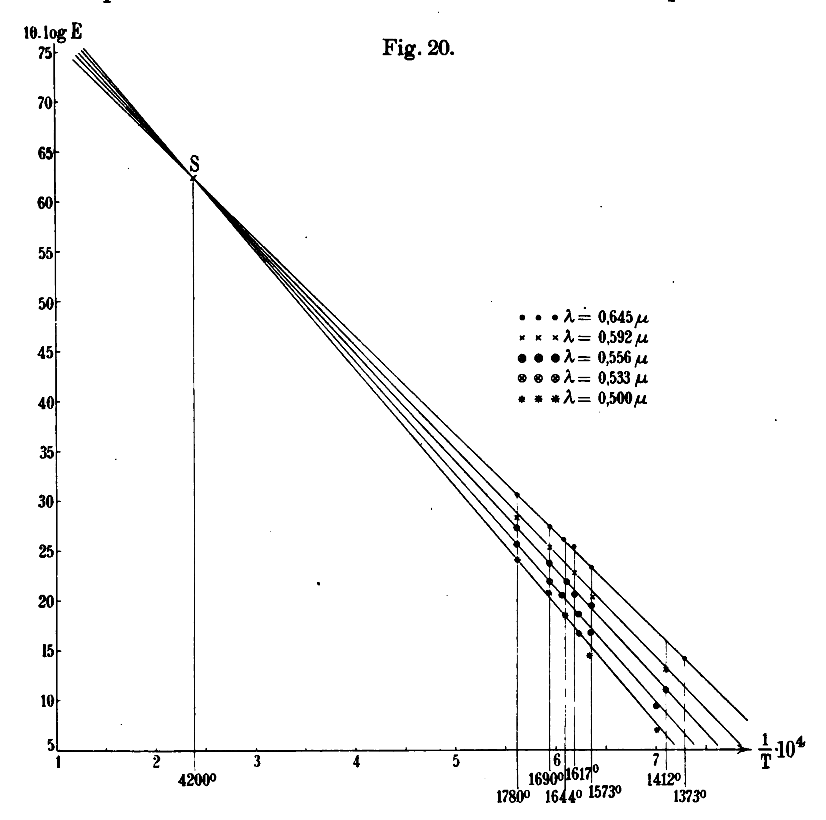


Fig. 20.

Kraters zu $T = 4207^0$ abs. aus den grauen Isochromaten (Fig. 19) und zu $T = 4200^0$ abs. aus den schwarzen Isochromaten.

d) Schwarze Temperatur des positiven Kraters. Ehe wir ältere Versuche zum Vergleich heranziehen, wollen wir eine wenn auch hypothetische Berechnung der schwarzen Temperatur des Kraters anstellen. Wir hatten im § 13 gefunden, daß die berechnete „schwarze“ Temperatur von der beobachteten wahren Temperatur des Glühfadens einer Kohlenfadenlampe bei

jedem Glühzustande um rund 15 Proz. abweicht (Tabelle II, S. 46). Selbstverständlich war die wahre Temperatur um 15 Proz. größer als die schwarze; z. B. betrug die wahre Temperatur beim höchsten Glühzustand 1680° abs. und die schwarze nur 1423° abs.

Ist eine Extrapolation dieser Resultate bis zur Normaltemperatur (4200° abs.) des positiven Kraters der Bogenlampe erlaubt, so würde sich als schwarze Temperatur ergeben:

$$T = 4200 - 15.42 = 3570^{\circ} \text{ abs.}$$

Das Mittel aller in Betracht kommenden Bestimmungen der schwarzen Temperatur des positiven Kraters der Bogenlampe hat, war 3700° abs. (§ 6), eine genügende Übereinstimmung vielleicht, um schließen zu dürfen, daß auch bei hohen Temperaturen bei der Kohle die schwarze Temperatur um etwa 15 Proz. von der wahren abweicht.

e) Wahre Temperatur des positiven Kraters, ermittelt aus älteren Versuchen. Im § 16 haben wir über eine Methode berichtet, welche erlaubt, die wahre Temperatur eines Temperaturstrahlers, dessen Strahlungseigenschaften zwischen denen des schwarzen Körpers und des blanken Platins liegen, zwischen eine obere und eine untere Grenze einzuschließen. Diese Methode erheischt nur, die Lage (λ_m) des Energiemaximums des betreffenden Körpers im Normalspektrum energetisch zu messen. Diese Lage ist für den positiven Krater der in Luft brennenden Bogenlampe von Lummer-Pringsheim zu $\lambda_m = 0{,}7\,\mu$ bestimmt worden, wonach gemäß jener von uns eingeführten Methode die wahre Kratertemperatur zwischen $T_{max} = 2940/0{,}7 = 4200^{\circ}$ abs. und $T_{min} = 2630/0{,}7 = 3757^{\circ}$ abs. liegen muß; die erstere Temperatur ist die richtige, wenn Kohle wie der schwarze oder ein grauer Körper strahlt; letztere, wenn sie wie blankes Platin strahlt. Da im sichtbaren Gebiet die Kohle der Bogenlampe wie ein grauer Körper strahlt, so ist nach jenen älteren Versuchen die obere Grenze $T_{max} = 4200$ abs. als die wahre Temperatur des Bogenlampenkraters anzusehen. Vergleichen wir hiermit meine neuesten Bestimmungen aus dem Schnittpunkt der logarithmischen Isochromaten $T = 4207^{\circ}$ abs. bzw. $T = 4200^{\circ}$ abs., so kann man nur sagen, daß der Zufall eine große Rolle gespielt haben muß, um eine derartige Übereinstimmung herbeizuführen!

Übrigens lege ich meiner neuesten Bestimmung einen größeren Wert bei als derjenigen aus der Lage λ_m des Energiemaximums, da diese damals nur auf die erste Dezimale genau bestimmt worden ist und eine genauere Bestimmung von λ_m übrigens auch nicht ganz leicht ist. Eine Ungenauigkeit um auch nur eine Einheit in der zweiten Stelle von λ_m würde aber laut Berechnung aus $T_{max} = 2940/\lambda_m$ statt der Temperatur $T_{max} = 4200^0$ abs. ergeben $T_{max} = 4141$ bzw. 4264^0 abs. Die Verlegung des Schnittpunktes S der logarithmischen Isochromaten müßte aber schon recht beträchtlich sein, um einen dieser beiden Werte zu ergeben.

C. Über den flüssigen Zustand des Kohlenstoffs.

§ 18.

Erstmalige Beobachtung des flüssigen Zustandes der Kohle auf dem positiven Krater der Bogenlampe bei vermindertem Luftdruck.

Folgende Fragestellung und die zu ihrer Beantwortung angestellten Versuche führten zur Beobachtung des leichtflüssigen Zustandes der Kohle. Da gemäß den im Teil A dieses Kapitels mitgeteilten Versuchsresultaten es sichergestellt war, daß die Normaltemperatur in weiten Grenzen konstant war, so lag die Frage nahe, zu untersuchen, ob diese konstante Verdampfungstemperatur die dem Atmosphärendruck zugehörige Sublimationstemperatur sei. In diesem Falle mußte die Temperatur des positiven Kraters vom Druck abhängig sein, und zwar mit abnehmendem Druck sinken, mit zunehmendem Druck steigen.

Ich beschränkte mich bei der Prüfung dieser Schlußfolgerung zunächst auf Versuche bei „Unterdrucken", d. h. bei Drucken, die kleiner als der normale Atmosphärendruck sind. Erstens weil sich diese Versuche leichter ausführen ließen, zweitens weil bei den Versuchen im Überdruck von vornherein erhebliche technische Schwierigkeiten zu erwarten waren.

Übrigens verdanke ich die erste Anregung zur Erörterung dieser Frage, ob und wie sich die Flächenhelligkeit des positiven Kraters mit abnehmendem Druck ändert, Herrn Prof. Stock, Direktor des Instituts für anorganische Chemie der Breslauer Technischen Hochschule, welchem ich gelegentlich von meinen im Teil A

geschilderten Versuchen über die Konstanz der Normaltemperatur erzählte. Wie aus der Anmerkung[1]) zu ersehen ist, war diese Frage aber von Le Chatelier schon vor Jahren (das Originalwerk von Le Chatelier ist 1908 erschienen) aufgeworfen worden, m. E. freilich zu früh, da die Konstanz der Kratertemperatur erst durch meine Versuche einwandfrei festgestellt worden ist (vgl. § 10).

Meine allerersten Versuche über die Änderung der Flächenhelligkeit des positiven Kraters mit abnehmendem Druck sind im Februar 1913 angestellt worden und zwar mit den primitivsten Mitteln. Ich verwendete als Druckgefäß eine große Luftpumpenglocke, deren unterer abgeschliffener Rand auf dem Luftpumpenteller luftdicht aufgesetzt und außerdem durch Kitt (Glaserkitt) abgedichtet wurde. Im Inneren befand sich die in Fig. 21 abgebildete automatisch regulierende Bogenlampe mit horizontaler positiver Kohle. Die Lampe konnte für kurze Zeit mit Strömen bis zu 30 Amp. belastet werden, ohne daß die Regulierungsvorrichtung versagte. Diese Lampe diente bis heute zu allen

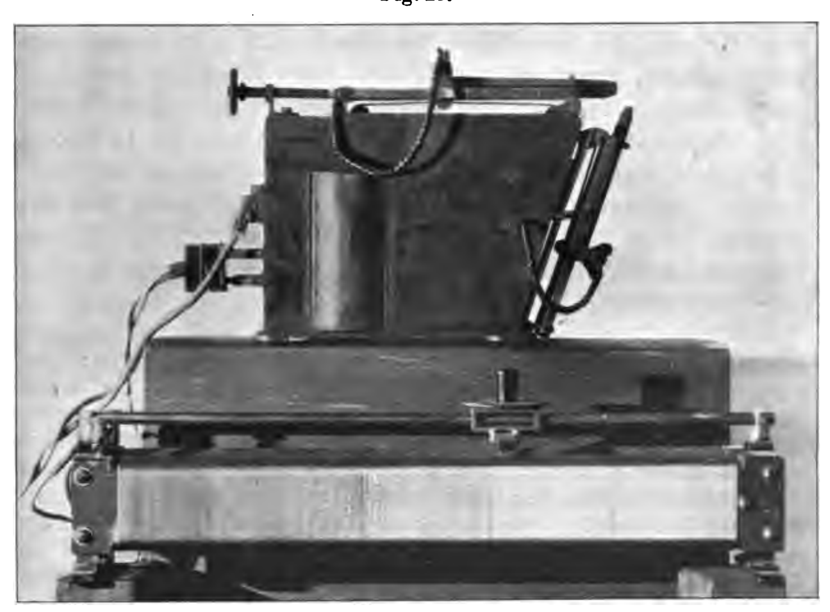
---

[1]) In der deutschen Übersetzung des Le Chatelierschen Werkes „Vom Kohlenstoff" (Halle, Verlag von Wilhelm Knapp, 1913) heißt es S. 56: „Der Kohlenstoff zeichnet sich durch besondere Schwerschmelzbarkeit aus, und es ist daher möglich, fast alle anderen Stoffe, sogar die Magnesia, im elektrischen Ofen mit Kohlenelektroden zu schmelzen, deren Temperatur natürlich höher sein muß als die der Körper, welche durch die von ihnen ausgehenden Strahlen erwärmt werden sollen. Man besitzt keine genaue Angabe über den Schmelzpunkt des Kohlenstoffs; einige Anzeichen deuten darauf hin, daß er in der Nähe von 3500^0 liegt, der höchsten Temperatur, die Kohlenelektroden im elektrischen Flammenbogen annehmen können. Der Ausgangspunkt für diese Annahme liegt in der folgenden Beobachtung: Wenn man den elektrischen Bogen durch einen Gleichstrom zwischen Kohlenelektroden erzeugt, dann nimmt der positive Pol eine konstante Temperatur an, welche von der Stromstärke unabhängig ist; nur der Umfang des erhitzten Teiles wächst mit der Intensität des Stromes. Man kann diese Temperaturkonstanz durch die Nähe des Schmelzpunktes erklären und es als eine Bestätigung dieser Hypothese betrachten, daß die von der negativen Elektrode fortfliegende Kohle sich auf der positiven Elektrode als eine plastische Masse niederschlägt. Manche Autoren nehmen aber auch an, daß die konstante Temperatur der Kohle dem Siedepunkt des Kohlenstoffs unter Atmosphärendruck entspricht und daß die Kohle sich verflüchtigt, ohne durch den flüssigen Zustand hindurchzugehen. Man könnte diese Hypothese prüfen, wenn man den Bogen im Vakuum brennen ließe; die Temperatur des positiven Kraters müßte dann beträchtlich sinken."

noch zu beschreibenden Versuchen über das Schmelzen der Kohle, über die Temperaturkurve des Kohlenstoffs usw.

Um die Glocke vor zu großer Bestrahlung zu schützen, wurde die ganze Bogenlampe mit Schirmen aus Asbest und Kupferblech umgeben, welche in der Höhe des positiven Kraters geeignete Ausschnitte zum Austritt der Kraterstrahlen besaßen. Die aus der Glocke austretenden Strahlen wurden durch ein Objektiv parallel gemacht. Im übrigen war die Versuchsanordnung ganz

Fig. 21.



die gleiche, wie sie in Fig. 2, S. 27 skizziert ist, nur daß bei L_1 der positive Krater der im Glasgehäuse befindlichen Bogenlampe leuchtete.

Die in der Luftpumpenglocke oben befindliche Öffnung wurde benutzt, um durch sie ein Verbindungsrohr zur Luftpumpe (Gaedepumpe) bzw. zum Manometer und außerdem die Zuleitungsdrähte zur Bogenlampe isoliert und luftdicht einzuführen. Bei der Montage wurde folgendermaßen verfahren: Es wurde die Glocke mit den eingekitteten Zuleitungsdrähten hochgehoben, dann wurden die Enden der Drähte mit der Bogenlampe verbunden, die Schutz-

gehäuse um die Bogenlampe richtig orientiert, die Glocke aufgesetzt und auf dem Teller luftdicht befestigt.

Trotzdem die Glasglocke nach wenigen Versuchsreihen sprang, so genügten diese doch, um folgende Resultate wahrscheinlich zu machen:

1. Die Flächenhelligkeit des positiven Kraters nimmt mit abnehmendem Druck, und ganz besonders bei relativ kleinen Drucken, beträchtlich ab (vgl. § 30 in Abschnitt D).

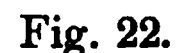
2. Schon bei geringer Druckerniedrigung scheint die positive Kraterfläche eine Art „zähflüssigen" Zustandes anzunehmen.

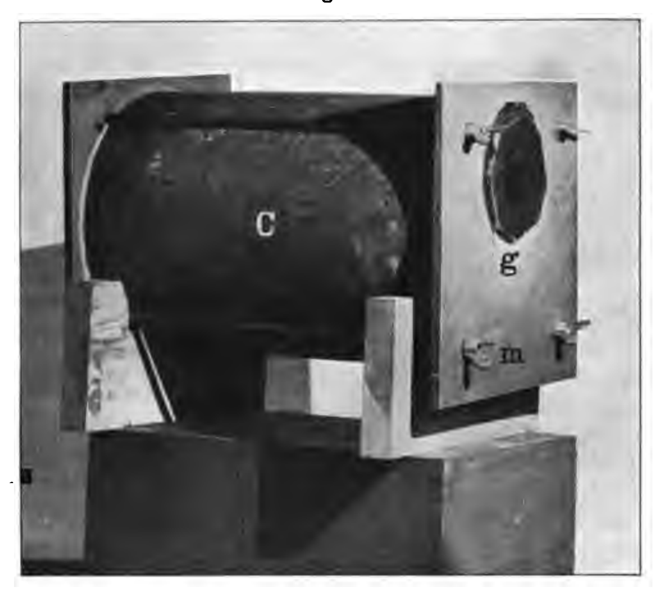
3. Im Unterdruck von etwa 1/2 Atm. nimmt bei „normaler" Belastung der Bogenlampe die ganze Oberfläche des positiven Kraters einen leichtflüssigen Zustand an: In der flüssigen, nicht abtropfenden Oberflächenschicht schwimmen hellere „Perlen" herum, als ob die Flüssigkeit „siedet" und „brodelt".

4. Bei weiterer Druckerniedrigung verschwindet dieser leichtflüssige Zustand wieder; der positive Krater nimmt ein immer zähflüssigeres Aussehen an, bis bei genügender Luftverdünnung der Krater wieder fest erscheint.

Um diese flüchtigen Beobachtungen in Ruhe studieren zu können, ließ ich das in Fig. 22 abgebildete Gefäß konstruieren. Dieses für Unterdrucke bestimmte Gefäß hat sich bis heute recht gut bewährt und gestattet, in kurzer Zeit eine Kohle durch eine andere auszuwechseln. Ein käuflicher Eisenzylinder *C* von 27 cm Durchmesser und 40 cm Länge ist an seinen beiden Enden eben abgeschliffen und mit ebenfalls eben geschliffenen Eisenplatten verschließbar. Deckel und Boden werden außerdem durch vier Eisenstangen mittels der Muttern *m* an den Zylinder angepreßt. Der vordere Deckel hat, wie die Figur zeigt, einen kreisrunden Ausschnitt, der mit einer dicken Spiegelglasplatte *g* bedeckt ist. Zur Abdichtung genügt Siegellack, da bei Evakuierung des Zylinders die Glasplatte vom äußeren Luftdruck an die Verschlußplatte gedrückt wird. Das Fenster dieser Platte befindet sich in solcher Höhe über dem Boden des Zylinders, daß die in ihm montierte Bogenlampe (Fig. 21) das Licht des positiven Kraters ungehindert nach außen senden kann. Auf dem Boden im Inneren des Zylinders sind geeignete

Führungsleisten angebracht, so daß die Bogenlampe nach dem Einbau stets die gleiche Lage einnimmt. Durch Bohrungen in die hintere Verschlußplatte waren die Leitungsdrähte isoliert eingeführt, welche ebenfalls wie die Verschlußplatten durch „Klingerit“ abgedichtet waren. Ihre Enden waren an die Bogenlampe angeschraubt und so lang, daß man die Lampe zum


Fig. 22.



Auswechseln der Kohlen herausnehmen konnte, ohne die Drähte lösen zu müssen.

Um die Länge des Flammenbogens der eingeschlossenen Lampe von außen willkürlich regulieren zu können, war in den Stromkreis der Regulierungsspule noch ein Regulierwiderstand eingeschaltet. Auch die Leitungsdrähte dieses variablen Widerstandes waren durch Bohrungen der hinteren Verschlußplatte isoliert und luftdicht eingeführt.

Zum Evakuieren diente ein ebenfalls durch die hintere Verschlußplatte luftdicht eingeführtes Rohr. Ein in diese Rohrleitung eingeschaltetes Quecksilbermanometer diente zur Messung des Druckes.

§ 19.

Leichtflüssiges Schmelzphänomen (Aussehen des flüssigen Kohlenkraters bei Anwendung starker Vergrößerung).

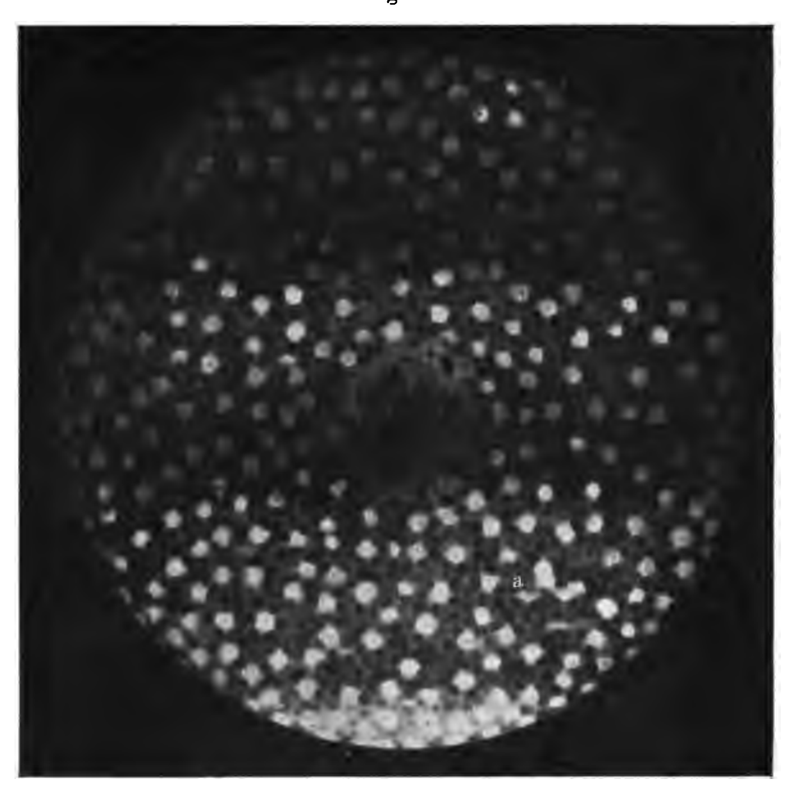
Solange ich zur Messung der Flächenhelligkeit des Kraters den in Fig. 2, S. 27 skizzierten Aufbau benutzte, hatte ich so kleine Vergrößerungen im Beobachtungsfernrohr angewandt, daß das Kraterbild nur das vom Interferenzstreifen-Phänomen eingenommene Gesichtsfeld ausfüllte, um die Helligkeit an jeder Stelle der Kraterfläche mit einem Blick messend verfolgen zu können. Hier stellte sich der leichtflüssige Zustand in der oben geschilderten Weise dar, d. h. es schienen runde helle „Perlen“ in der dunkleren Flüssigkeit herumzuwirbeln, und es machte den Eindruck, als ob die Flüssigkeit „brodelte“ und „kochte“. Bei Anwendung genügend starker Vergrößerung, wie sie zuerst bei der Vorführung des Phänomens im Vortrag angewendet wurde (vgl. Vorwort), stellte sich das Phänomen in einem ganz anderen Gewande vor. Um die hierbei bemerkten komplizierten Einzelheiten bequemer und genauer beobachten zu können, wurde von jetzt ab die Beobachtung durch das Fernrohr verlassen und die objektive Beobachtung gewählt, indem durch ein vorzügliches Objektiv[1]) vom Krater ein etwa 30fach vergrößertes scharfes Abbild auf einem gut eben geschliffenen Gipsschirm entworfen wurde. Es konnten jetzt zugleich mehrere Beobachter das Phänomen aus der Nähe und in Ruhe deutlich beobachten. Hierbei bemerkte man, daß jene im Fernrohr als „Perlen“ sich darbietenden helleren Individuen im dunkleren Flüssigkeitsteich in Wirklichkeit eine eckige Gestalt besaßen und daß die Flüssigkeit weder „brodelte“ noch sichtbar „siedete“. Vielmehr war dieses Aussehen vorgetäuscht worden durch die schnelle und lebendige Bewegung der hellen Individuen, als man sie noch bei Anwendung einer geringeren Vergrößerung durch das Fernrohr beobachtete.

Leider läßt sich das bei starker Vergrößerung auf dem diffusen Gipsschirm sich darbietende, kaleidoskopartig von Moment

[1]) Für die gütige leihweise Überlassung dieses Objektivs möchte ich der Firma C. P. Goerz u. Co. in Berlin-Friedenau auch hier bestens danken.

zu Moment sich ändernde und künstlerisch schöne Bild des leichtflüssigen Kraters weder durch Worte noch durch photographische Aufnahmen wiedergeben. Eine Momentaufnahme des Phänomens, wie sie z. B. in Fig. 23 reproduziert ist, ist nur ein toter Abglanz des lebendigen Schauspiels. Leider aber kann eine kinematographische Aufnahme der Broschüre nicht beigelegt werden.

Fig. 23.



Bei der photographischen Aufnahme des Phänomens wurde folgendermaßen verfahren. Vor der Gipsscheibe war auf einem Schlitten eine Kassette für Platten 18×24 cm parallel zur Ebene der Gipsfläche leicht verschiebbar. Die Kassette war mit einem Schlitzverschluß nach Anschütz versehen, die nach Art einer Rolljalousie eingerichtete Verschlußwand war mit dünnem Gipsbrei weiß angestrichen. Solange die Kassette durch diese Rollwand

verschlossen war, bildete sich der Krater auf dieser weiß gestrichenen Rollwand ab und man verschob durch eine geeignete Vorrichtung[1]) das abbildende Objektiv vom Ort der Kassette aus so lange, bis das Abbild die größtmöglichste Schärfe zeigte. Hatte man das zu photographierende Phänomen erzeugt, so wurde der Schlitzverschluß betätigt. Die Hervorbringung des gerade gewünschten Phänomens wurde durch Herstellung des geeigneten Druckes und der dazu gehörigen maßgebenden Stromstärke bzw. Bogenlänge bewirkt.

Im folgenden wollen wir berichten, was man auf Grund der subjektiven Beobachtung und der objektiven Momentaufnahme über das Phänomen aussagen kann, wobei beide Arten der Anschauungen sich ergänzen müssen. Wir beschränken uns zunächst auf die Schilderung des Tatbestandes, ohne etwas über die Entstehung und das Wesen der helleren Individuen im dunkleren Flüssigkeitsteich auszusagen. Wie ein Blick auf die Fig. 23 und die subjektive Beobachtung ergänzend lehrt, haben wir es mit drei gesondert zu betrachtenden Elementen zu tun: 1. Mit einer Flüssigkeit. 2. Mit den in dieser befindlichen, heller als die Flüssigkeit leuchtenden, eckigen Individuen („Fische“). 3. Mit den hell umränderten, eckig begrenzten und auf dem Grunde der Flüssigkeit sitzenden Figuren („Waben“).

1. Die Flüssigkeit. Da man auf dem stark vergrößerten Abbild (Fig. 23) des „flüssigen“ Kraters absolut nichts vom Sieden oder Brodeln bemerken kann, so ist die von jedem Beobachter gestellte Frage, ob man es mit einer wirklichen Flüssigkeit zu tun hat, nur zu berechtigt. Wer freilich das Phänomen im schwach vergrößernden Fernrohr gesehen hat, dem kommt diese Frage beinahe komisch vor, gleichsam als ob ein Farbentüchtiger gefragt würde, warum er „Weiß“ als Weiß oder „Rot“ als Rot sieht. Instinktiv rief ich bei der erstmaligen Beobachtung des flüssigen positiven Kraters im Fernrohr aus: „Der Krater ist flüssig!“ Welche Kriterien ließen mich ohne Nachdenken erkennen, daß der Krater sich in flüssigem Zustande befand? Konnte dabei der flüssige Zustand durch optische Täuschung hervorgerufen sein?

---

[1]) Siehe § 29, wo der ganze Aufbau aus den dazu gehörigen Figuren zu ersehen und m der kleine Motor ist, welcher das Objektiv stetig um genügend kleine Beträge zum Krater hin oder von ihm fort bewegt und von der Kassette bzw. dem Gipsschirm aus in Tätigkeit gesetzt werden.

Lehrt doch die „Fata Morgana“ zur Genüge, daß tatsächlich ein „Flüssigkeitsteich“ lediglich durch anomale Strahlenbrechung („gebogene“ Lichtstrahlen) vorgetäuscht werden kann, in welchem man ferne Gegenstände gespiegelt und auf dem Kopfe stehend erblickt. Bei dem wunderschönen Versuch von Wood über die künstliche Nachahmung der „Fata Morgana“ sieht man eine von unten geheizte „Sandwüste“ auf einer langen Strecke belegt mit einem „Quecksilberteich“, der leicht flüssig ist und in welchem sich entfernt aufgestellte Gegenstände total zu spiegeln scheinen. Wo immer der Augenschein lehrt, daß eine reflektierende Fläche wie eine Flüssigkeit zu spiegeln scheint und Bewegung zeigt, da glauben wir es mit einer wirklichen Flüssigkeit zu tun zu haben. Einen ganz anderen Eindruck bringt der im Fernrohr beobachtete positive Krater hervor, sobald er anfängt, flüssig zu werden. Hier ist der Eindruck der Kraterfläche so vollkommen der einer Flüssigkeit, daß in keinem Beobachter auch nur eine Andeutung der Frage aufsteigt, ob er es mit einer vorgetäuschten oder wirklichen Flüssigkeit zu tun hat. Solange der Krater fest ist, erscheint er wie eine diffuse beleuchtete Fläche, auf der sich die Risse und Sprünge als dunkle, feststehende Stellen markieren, vergleichbar dem Vollmond mit seinen Kratern und Rissen. Im flüssigen Zustand macht der Krater dagegen den Eindruck, als ob er mit einem „brodelnden“ und „kochenden“ Teich bedeckt ist, und in ihm tummeln sich die als helle „Perlen“ erscheinenden Fische, schnell von Ort zu Ort eilend. Sobald man den Krater aus dem flüssigen in den festen Zustand zurückkehren läßt, nimmt die Kraterfläche wieder das starre und tote Aussehen an.

Anders ist es beim Abbild des flüssigen Kraters auf dem Gipsschirm oder auf der photographischen Platte. Auf letzterer sieht man nicht einmal die lebhafte und schnelle Bewegung der helleren Fische in der Flüssigkeit, die wenigstens beim Anschauen den Eindruck erweckt, als ob die Fische in einem Teiche von Flüssigkeit schwimmen. Und doch kann man auch hier Kriterien finden, welche sicher darauf schließen lassen, daß der Krater mit Flüssigkeit überzogen ist. Auch hier verwandelt sich das Bild aus einem lebendigen zu einem toten Gebilde, wenn man den „flüssigen“ in den festen Zustand überführt, zumal bei Homogenkohlen, die im festen Zustande nur zu gern „reißen“ und Spalten

erhalten. Dann erscheint die Kraterfläche wie die tote Mondscheibe, auf der wie bei dieser die Risse sich scharf umrändert und dunkel von den diffus erscheinenden, leuchtenden Flächen des Kraters abheben und auf welcher vom Fließen keine Spur zu bemerken ist.

Bringt man dann das Schmelzphänomen hervor, so sieht man da, wo der Bogen das Schmelzen bewirkt, Flüssigkeit fließen, die sich gleichsam ausbreitet, bis sie bei geeigneten Stromverhältnissen die ganze Kraterfläche bedeckt. Bei gewissem Druck kann man auch ein „zähes" Fließen beobachten, wobei die zähe Flüssigkeit ein „schlieriges" und „wellenartiges" Aussehen annimmt.

Aber auch im leichtflüssigen Zustand des Kraters, welcher in Fig. 23 als Typus reproduziert ist, kann man eindeutig auf das Vorhandensein einer wahren Flüssigkeit schließen, zumal wenn sich eine dünne feste Kruste („Eiskruste") an einzelnen Stellen der Oberfläche ausgebildet hat. Diese Erscheinung ist in Fig. 26 und in Fig. 32 festgehalten worden. Man erkennt deutlich unter der „Eiskruste" die Fische. Bei subjektiver Betrachtung dieses Phänomens sieht man die Fische unter der Eiskruste sich sogar bewegen, genau wie an den Stellen, wo keine Eiskruste sich gebildet hat. Da die Eiskruste mit ihrem Rande nicht fest mit dem Kraterumfang verwachsen ist, so müßte man bei Leugnung einer wirklichen Flüssigkeitsschicht annehmen, daß jene Eiskruste in der Luft schwebt.

Die Flüssigkeit leuchtet mit viel geringerer Helligkeit als die Eiskruste, und diese hinwiederum mit etwas geringerer Helligkeit als die Fische. Bei genügender Dünne scheint die Eiskruste fast vollkommen durchsichtig zu sein. Wenigstens erblickt man durch sie hindurch die auf dem Grunde des Teiches sitzenden hell umränderten eckigen Waben, als ob die Flüssigkeit selbst gar nicht leuchtend wäre.

2. Die Fische. Bei welchem Druck und bei welcher Kohlensorte man auch den leichtflüssigen Zustand des positiven Kraters herstellt, stets sind im Flüssigkeitsteich die heller als die Flüssigkeit leuchtenden Fische vorhanden, deren Aussehen und Verhalten wir jetzt schildern wollen.

a) Gestalt. Bei subjektiver Beobachtung ist es wegen der schnellen Bewegung der Fische von Ort zu Ort außerordentlich schwer, etwas Bestimmtes über deren Gestalt auszusagen. Sicher

aber lehrt schon ein einziger Blick, daß die Fische zweifelsohne von eckiger Gestalt sind. Ob die Fische aber eine fünf- oder sechseckige Gestalt haben, oder ob auch solche von anderer Gestalt vorkommen, ist kaum mit Sicherheit zu beobachten. Hier muß die Momentaufnahme ergänzend zu Hilfe genommen werden.

Betrachtet man alle auf den Tafeln reproduzierten Figuren, soweit sie den leichtflüssigen Zustand wiedergeben, der sich auf der ganzen Kraterfläche nur beim Druck von etwa $^1/_2$ Atm. („kritischer“ Druck) und bei gewisser Stromstärke („kritische“ Stromstärke) herstellt (vgl. § 21), so scheinen die Fische meistens eine sechseckige Gestalt zu besitzen. Wohl zählt man auch eine große Anzahl von fünfeckigen Fischen. Nur scheint es mir, auf Grund des später zu besprechenden Befundes, als ob die fünfeckigen Fische erst durch Abschmelzen usw. aus den sechseckigen entstanden seien. Doch wie gesagt wollen wir uns hier zunächst lediglich an Beobachtungstatsachen halten und darum es bei obigem Ausspruch bewenden lassen, daß die Aufnahmen auf eine meist sechseckige Gestalt hindeuten.

b) Bewegung. Beim Anblick des Schmelzphänomens, zumal im leichtflüssigen Zustand, tritt dem Beobachter ein solches „Leben“ und eine solche „Lebendigkeit“ der sich tummelnden Fische entgegen, daß es kaum möglich ist, über die Bewegung eines einzelnen Fisches etwas Genaues festzustellen. Dazu muß man seine Aufmerksamkeit auf einen Fisch konzentrieren, der sich am Rande des Teiches aufhält oder noch besser das Schmelzphänomen bei relativ geringem Druck beobachten, bei welchem die Fische größer sind und sich langsamer bewegen (§ 21). Jedenfalls konnte folgendes festgestellt werden.

Jeder Fisch bewegt sich nur um eine kleine Strecke vorwärts, um sich dann in einer hell umränderten „Lücke“ oder „Wabe“ festzusetzen, dort zu schmelzen und damit zu verschwinden, da die Schmelze sich in bezug auf Helligkeit und Durchsichtigkeit in nichts von der übrigen Flüssigkeit unterscheidet. Sobald der Fisch sich in einer Wabe eingenistet hat, beginnt er auch sofort zu schmelzen, und zwar meist zuerst in der Mitte. Jene dunkleren Stellen inmitten der hellen Fische auf Fig. 23, S. 72 deuten den Beginn des Schmelzens an, welches sich dann schnell über den ganzen Fisch ausbreitet. Bei subjektiver Beobachtung kann man dies deutlich verfolgen. Dabei sieht man auch, daß die Fische

ihre eckige Gestalt schon haben, ehe sie in einer der eckigen Waben sich festsetzen und daß sie auf dem kurzen Wege ihres Daseins noch nicht zu schmelzen beginnen, wohl weil die Zeit dazu nicht ausreicht. Wie klein ihre Lebensdauer ist, kann man vielleicht aus der Aufnahme erschließen. Diese betrug bei der Fig. 23 etwa $^1/_{20}$ Sekunde. Im Moment der Aufnahme sitzen die meisten Fische in Waben fest und nur an wenigen Stellen (z. B. bei a) sind Andeutungen von der subjektiv festgestellten Bewegung vorhanden. Die bei a abnorme Größe der Fische deutet meines Erachtens darauf hin, daß dieselben sich trotz der kurzen Expositionszeit von nur $^1/_{20}$ Sekunde fortbewegt haben. Es steht diese Schlußfolgerung wenigstens in Einklang mit der subjektiven Beobachtung, bei welcher die schnelle Ortsveränderung der Fische und ihr schnelles Verschwinden jenen kaleidoskopartigen Eindruck des Phänomens hervorrufen, gleichzeitig aber auch den Reiz des Schauspiels bedingen. Diejenigen Fische, welche noch keine Schmelzstelle zeigen, müssen sich während der Expositionsdauer eben eingenistet haben, oder im „Entstehen“ begriffen sein.

Was das „Entstehen“ der Fische betrifft, so sieht man bei subjektiver Beobachtung deutlich, daß die Fische aus den Waben am Grunde des flüssigen Teiches herauskommen, um, wie geschildert, hastig nach einer anderen Wabe zu eilen und dort zu schmelzen. Damit soll nichts über die Bildung der Fische ausgesagt sein, außer was den Ort anbelangt, von welchem sie in die Erscheinung bzw. in ein selbständiges, wenn auch nur kurz bemessenes Dasein treten[1]).

c) Fest. Daß die Fische keine „Schaumbläschen“ (vgl. Vorwort), sondern „feste“ Individuen sind, scheint mir aus folgenden Beobachtungen sicher hervorzugehen. Einmal dürfte dafür sprechen, daß die sich bewegenden Fische eine eckige Gestalt besitzen. Ferner sieht man niemals einen Fisch zerspringen, wie es wohl eintreten müßte, wenn sie „Bläschen“ oder „schaum-

---

[1]) Oft führt der Bogen eine wirbelnde Bewegung aus und dreht sich mit großer Rotationsgeschwindigkeit bald im Sinne des Uhrzeigers, bald im entgegengesetzten Sinne um die horizontale Richtung des positiven Kohlenstabes als Achse. Diese Wirbelbewegung des Flammenbogens hat, soweit wir es feststellen konnten, keinen Einfluß auf das Phänomen bzw. die Eigenbewegung der Fische.

artige“ Gebilde wären. Mindestens beim Schmelzen müßten diese doch wenigstens platzen und das könnte bei der Beobachtung nicht unbemerkt bleiben. Sicherer scheint mir aber für die feste Struktur der Fische der Umstand zu sprechen, daß sie sich zumal beim dickflüssigen Zustande des Kraters oft am kälteren Rande desselben festsetzen und dort als festgewachsene „Steine“ langsam abglühen, bis sie vom anfangs dunkleren Kraterrand nicht mehr zu unterscheiden sind. Auch hierbei behalten sie ihre eckige Gestalt.

d) Plastisch. Aus vielfachen und oft beobachteten Merkmalen scheint auch sicher festgestellt zu sein, daß die Fische die Eigenschaft der „Plastizität“ besitzen. Es folgt dies meines Erachtens schon aus der Willigkeit, mit welcher die eckigen Fische sich in eine beliebige Wabe einschmiegen und diese genau ausfüllen. Ferner scheint aber auch folgende Beobachtung dafür zu sprechen. Benutzt man Homogenkohlen, die, wie schon erwähnt, beim Glühen leicht zerreißen und Risse bilden, so füllen sich letztere mit der flüssigen Schmelze an und auch in diesen mit Flüssigkeit angefüllten Spalten sind die hellen Fische vorhanden. Diese haben hier aber meist eine viereckige, fast quadratische Form, die wohl nur der Plastizität der Fische und den von den Spalträndern ausgeübten Kräften ihre Entstehung verdankt. In einigen Figuren sind solche „viereckigen“ Fische in Spalten zu erkennen. Die Fische werden von allen denen als plastisch anerkannt, die das Schmelzphänomen in allen Phasen genauer beobachtet haben. Trotzdem möchte ich noch nichts Endgültiges über die Plastizität der Fische behaupten.

e) Größe. Über die Größe der Fische wird im übernächsten § 21 genauer berichtet, welcher vom Schmelzphänomen bei verschieden großem Druck und von der Variation der Fischgröße mit dem Druck handelt.

3. Waben. Als solche wurden von mir die merkwürdigen, hellbraun umränderten, eckigen und den „Bienenwaben“ ähnelnden Figuren bezeichnet, welche man auf fast allen Momentaufnahmen erkennt. Diese Waben bilden ein zusammenhängendes Netzwerk, welches fest auf dem Boden des Flüssigkeitsteiches sitzt. Sie leuchten durch die Flüssigkeit hindurch, wenn auch mit sehr viel geringerer Helligkeit als die sehr hellen Fische. Wie diese haben auch die Waben eine meist sechseckige Gestalt,

obgleich auch hier wie bei den Fischen Abweichungen von dieser Gestalt zu beobachten sind. Hat sich ein Fisch aus seiner Wabe losgelöst und setzt sich in diese kein anderer Fisch fest, so verschwindet mit der Zeit auch der helle Rand der Wabe und damit auch diese. Ein Blick auf das photographierte Schmelzphänomen lehrt, daß immer mehr Waben als Fische vorhanden sind; dieser Befund wird durch die subjektive Beobachtung bestätigt.

Bei Durchsicht der Literatur ist mir glücklicherweise eine Abhandlung[1]) in die Hände geraten, in der ebenfalls von einem Netzwerk sechsseitiger Maschen die Rede ist. Petzholdt berichtet über die Dumas-Stasschen Versuche (§ 1), bei denen die Aschenreste der verbrannten Diamanten sich als rötliche Substanz darstellten, deren Teile bisweilen eine glänzende Oberfläche zeigten, als ob sie bereits farbig gebildet in den Rissen des verbrannten Minerals eingeschlossen gewesen waren. Petzholdt stellte fest, daß diese rötliche Substanz der Hauptsache nach aus einer Unzahl sehr kleiner Schuppen, Blätter und Splitter bestand, denen nur höchst selten derbere und mehr rundliche Stückchen beigemengt waren. Von den verschiedenen Einschlußstückchen glänzten die meisten ziemlich stark, am stärksten einige schwarze und undurchsichtige. „Der vor allem wichtigste Umstand war jedoch unstreitig der, daß an nicht wenigen solcher Körper ein feines schwarzes oder dunkelbraunes Netzwerk[2]) nicht zu verkennen war, mit sechsseitigen Maschen, bisweilen mehrfach übereinander liegend, genau wie man es bei der mikroskopischen Untersuchung des Pflanzenparenchyms zu sehen gewohnt ist. Nicht selten erschien es in einem der Auflösung nahen oder darin begriffenen Zustande, so daß einzelne Teile dieses Netzwerkes anfingen, durch Ineinanderfließen zu verschwimmen und undeutlich zu werden, während es an denselben Stellen in einiger Entfernung davon noch sehr deutlich erhalten war.“

„Ich gestehe, daß trotz des Befremdenden ich mich des Gedankens nicht habe entschlagen können, es seien diese Netzwerke und damit die in Verbindung stehenden schwarzen Substanzen nichts weiter als vegetabilische kohlige Reste, deren

---

[1]) A. Petzholdt, „Über die bei der Verbrennung des Diamants zurückbleibende Asche“. Journ. f. prakt. Chem. 23, 475—479, 1841.

[2]) Anm. des Verf.: Alle gesperrt gedruckten Stellen habe ich unterstrichen.

Verbrennung gleichzeitig mit derjenigen des Diamants nur dadurch verhindert werden konnte, daß sie von einem der Verbrennung unfähigen Körper umschlossen waren".

Petzholdt stimmt Erdmann und Marchand bei, welche meinen, daß die beschriebenen Körperchen bereits gebildet in den Rissen der verbrannten, meist gelblich oder rauchgrau gefärbten Diamanten eingeschlossen gewesen wären. Er untersucht daraufhin mikroskopisch die großen unter Nr. 16 bzw. 17 des „grünen Gewölbes" in Dresden eingetragenen braunen bzw. blauen Diamanten: Beide zeigen diese Erscheinungen. Der in der Königl. Mineralsammlung zu Dresden vorhandene kleine nelkenbraune Diamant (Nr. 22 des Katalogs) „läßt in dieser Beziehung nichts zu wünschen übrig ... in seiner Mitte liegt ein kleines, braunes, durchsichtiges, dreieckiges Blättchen, an welchem sogar Teile jenes oben erwähnten Netzwerkes, obwohl schon im Zustande der Auflösung begriffen, erkannt werden können".

Welche Bedeutung Petzholdt diesen Beobachtungen meines Erachtens mit Recht beilegt, geht daraus hervor, daß er die Aufforderung an andere richtet, bei Untersuchung der Diamanten diesen Gegenstand „schärfer ins Auge zu fassen, vielleicht, daß sich noch Wichtiges herausstellt". Übrigens habe auch Parrot nach seiner Notiz „Über Diamanten des Uralgebirges" im Inneren dieser Diamanten schwärzliche Flecken beobachtet, welche er mit großer Wahrscheinlichkeit für Kohlenstoff anspricht.

Aus alledem zieht Petzholdt folgenden Schluß: „Die Entstehung des Diamants anlangend, ist vorliegende Untersuchung wohl imstande, eine anderweitige Stütze der Entstehung des Diamants aus dem Organischen zu begründen, für welche sich Liebig (Organische Chem., S. 286) folgendermaßen ausspricht: »Die Wissenschaft bietet in allen Erfahrungen außer dem Prozesse der Verwesung keine Analogien für die Bildung und Entstehung des Diamants dar. Man weiß gewiß, daß er seine Entstehung nicht dem Feuer verdankt, denn hohe Temperatur und Gegenwart von Sauerstoff sind mit seiner Verbrennlichkeit nicht vereinbar. Man hat im Gegenteil überzeugende Gründe, daß er auf nassem Wege, daß er in einer Flüssigkeit sich gebildet hat, und der Verwesungsprozeß allein gibt eine bis zu einem gewissen Grade befriedigende Vorstellung über seine Entstehungsweise«."

Wenn ich dieser älteren Literaturnotiz soviel Raum eingeräumt habe, so geschah es wegen der großen Analogie zwischen dem von Petzholdt geschilderten „Netzwerk von sechseckigen Maschen" an dem im Diamanten eingeschlossenen „Kohlenstoff" und der Wabenstruktur auf dem Grunde des flüssigen Kohlenstoffteiches beim leichtflüssigen Schmelzphänomen. Mehr aber noch aus dem Grunde, weil ich anfänglich glaubte, die hellen „Fische" im Teiche als Diamantkristalle ansprechen zu sollen, die sich durch Auskristallisation beim Erstarren des flüssigen Kohlenstoffs auf dem kälteren Grunde unter der Oberfläche gebildet haben könnten. (Über das wahre „Wesen der Fische" siehe den nächsten Paragraphen.) Dieser Meinung war ich so lange, als ich die Fische, zumal in den Spalten und Rissen des Kohlenkraters, meist noch als von viereckiger „kubischer" Gestalt angesprochen hatte (vgl. Nr. b dieses Paragraphen), ist doch die Würfelform die Grundform des Diamantkristallsystems, welche in Natur, meist bei den brasilianischen Diamanten vorkommt. Wie dem aber auch sei, ich glaube, daß die hier dargelegten Unterlagen für den Mineralogen und Geologen nicht ohne Interesse sein dürften und neue Anregungen zu liefern imstande sind.

§ 20.

Hypothetisches über das Wesen und die Entstehungsart der Fische.

Zusammenhang zwischen Fischen und Waben.

Wie schon der Titel andeuten soll, begeben wir uns bei der Erörterung des Wesens der Fische und ihrer Entstehungsgeschichte auf das Gebiet der Hypothese und ich möchte vorausschicken, daß die an und für sich interessante und von allen Beobachtern viel diskutierte Frage nach dem Wesen der Fische auch nicht im geringsten das vielleicht noch wichtigere Problem tangiert, ob wir es bei der Schmelze auf dem positiven bzw. negativen Krater mit dem flüssigen Zustande reinen Kohlenstoffs zu tun haben. Gleichwohl sei es mir gestattet, auf Grund meiner Beobachtungen mein in dieser Hinsicht rein subjektives Urteil über das Wesen der Fische darzulegen, welches auf folgenden Tatsachen aufgebaut ist.

1. Zusammenhang zwischen den Fischen und Waben. Ich glaube noch auf dem Boden der Tatsachen zu stehen, wenn ich behaupte, daß die Waben und Fische in einem ursächlichen Zusammenhang stehen. Gleich nachdem die wabenartige Struktur bei dem stark vergrößerten Schmelzphänomen mit den im vorigen Paragraphen geschilderten Begleiterscheinungen beobachtet worden war, drängte sich mir die innige Wechselbeziehung zwischen den Waben und Fischen auf und gleichzeitig die Vermutung, daß die Bildung beider durch Auskristallisation aus der Flüssigkeit auf dem kälteren Grunde des Teiches bei dessen Erstarrung zu deuten sei. Hieraus folgerte ich weiter, daß die Fische und Waben auch erst dann in die Erscheinung treten dürften, wenn der Flüssigkeitsteich schon einmal erstarrt und dann wieder geschmolzen sei. Oder in anderen Worten: Es dürften keine Fische und Waben auftreten, wenn man eine Kohle zum ersten Male schmilzt.

Eine nachträgliche experimentelle Prüfung ergab tatsächlich die Richtigkeit dieser letztgenannten logischen Folgerung: Beim erstmaligen Schmelzen einer neuen Kohle bedeckt sich diese, wenn auch nur momentan, mit der dunkel leuchtenden Flüssigkeit, ohne daß in ihr die hellen Fische noch durch sie hindurch die wabenartige Struktur zu beobachten ist. Freilich bleibt dieses nicht leicht herzustellende Phänomen nur für Momente erhalten, um sich dann plötzlich in das oben geschilderte gewöhnliche Schmelzphänomen zu verwandeln: Dann wimmeln plötzlich die hellen Fische im Teiche herum und die wabenartige Struktur leuchtet durch diesen hindurch. Aus dem Aussehen der oft auf dem leichtflüssigen Teiche oberflächlich sich bildenden Eiskruste kann man schließen, daß der flüssige Kohlenstoff an der Oberfläche in amorpher Form erstarrt, während er sich am kälteren Grunde des Teiches unter der Oberfläche in kristallinischer Form abzuscheiden scheint und zwar in Gestalt von Graphitkristallen.

2. Wesen der Fische. Für die Hypothese, daß die Fische Graphitkristalle sind, sprechen meines Erachtens die folgenden Gründe. Erstens die meist sechseckige Gestalt der Waben, die wir gemäß meiner Hypothese als „Kristallisationsbett" anzusehen haben, und die meist sechseckige Gestalt der aus diesen Waben losgeschmolzenen Fische. Von den drei bekannten Modifikationen des Kohlenstoffs kristallisiert allein der Graphit als hexagonale Plättchen im monoklinen System aus (vgl. § 1).

Zweitens wissen wir vom Graphit, daß er metallisch absorbiert, so daß er, wenn wir das Kirchhoffsche Gesetz von der Emission und Absorption (s. § 13) zu Rate ziehen und annehmen, daß der Graphit auch im hoch erhitzten Zustande gleich stark absorbiert wie bei gewöhnlicher Temperatur, bei hoher Temperatur gut emittieren und stark leuchten muß. Es wäre dadurch die viel größere Helligkeit der Fische im Vergleich zu derjenigen des flüssigen Kohlenstoffs erklärt, welcher entsprechend seiner größeren Durchsichtigkeit (vgl. § 19) trotz seiner höheren Temperatur nach dem Kirchhoffschen Gesetze dennoch entsprechend sehr viel weniger leuchten muß als die festen Graphitkristalle.

Drittens kann man auch die bekannte Tatsache anführen, daß von allen Modifikationen des Kohlenstoffs der Graphit die beständigste Form ist.

Viertens könnte man die Plastizität der Fische begreifen, wenn diese wirklich Graphitkristalle sind, da Graphit schon im kalten Zustande plastisch ist (vgl. § 1).

Trotz dieser angeführten Gründe möchte ich nochmals das Hypothetische meines Schlusses betonen und die Kollegen auf physikalisch-chemischem, auf rein chemischem, mineralogischem und geologischem Gebiete auffordern, bei der Lösung des „Fischrätsels“ mitzuhelfen.

§ 21.

Leichtflüssiges Schmelzphänomen im Druckintervall von etwa $^1/_5$ bis etwa 2 Atm.

Die erstmalige Beobachtung des flüssigen Zustandes der Kohle wurde, wie erwähnt, beim Unterdruck von etwa $^1/_2$ Atm. gemacht (§ 18). Bei genauerer Untersuchung konnte man dann auch etwas oberhalb und unterhalb dieses „bevorzugten“ Druckes das Schmelzen beobachten, wenigstens ein „zähes Fließen“ oder ein „Blasenwerfen“ des positiven Kraters.

Nachdem erkannt worden war, daß wir es wohl mehr mit dem Schmelzphänomen als mit dem Siedezustand zu tun haben, ergab sich die Folgerung, daß dann das im vorigen Paragraphen geschilderte leichtflüssige Schmelzphänomen mit allen seinen Einzelheiten eigentlich bei jedem Drucke auftreten und

wohl auch zu beobachten sein müßte, wenn es gelänge, die zum Schmelzen notwendige Temperatur zu erreichen.

Tatsächlich gelang es nach einigem systematischen Probieren, den leichtflüssigen Zustand auch bei Drucken zu erhalten, bei denen früher gar kein Schmelzen beobachtet worden war. Relativ leicht ließ sich der leichtflüssige Zustand bei Drucken unterhalb einer Atmosphäre bis herab zu etwa $^1/_5$ Atmosphärendruck herstellen. Schwieriger, weil allen Erfahrungen widersprechend, gestaltete sich das Auffinden des leichtflüssigen Zustandes beim Normaldruck und bei Überdrucken. Dies gelang erst, als man herausgefunden hatte, daß der Flammenbogen das Schmelzen der Bogenlampenkohle beim Normaldruck nicht bei Anwendung ungewöhnlich großer, sondern ungewöhnlich kleiner Stromstärken bewirkt. Mindestens liegt die bei Atmosphärendruck zum Schmelzen notwendige Stromstärke unterhalb derjenigen, welche man laut Vorschrift verwendet, um bei gegebener Dicke des positiven Kohlenstabes eine möglichst große Oberfläche des Kraters im festen Zustande zum hellen und gleichmäßigen Leuchten zu bringen.

Hierdurch ist die überraschende Tatsache festgestellt, daß bei der Gleichstrom-Bogenlampe die kleinere Stromstärke eine größere Heizwirkung ausübt als eine übertrieben starke Stromintensität. Aus den später mitgeteilten Temperaturmessungen geht hervor, daß beim Normaldruck die Schmelztemperatur tatsächlich höher als die Temperatur des festen Kraters ist.

Auf Grund dieses Befundes bedarf das im Teil A dieses Kapitels erörterte und ausgesprochene Resultat, daß die Temperatur des positiven Kraters der in freier Luft brennenden Bogenlampe unabhängig von der Stromstärke und Bogenlänge ist, einer Einschränkung: Diese Normaltemperatur ist nur so lange konstant bei jeder Stromstärke und Bogenlänge, als der positive Krater in festem Zustande verdampft und nicht die flüssige Phase passiert. In anderen Worten, solange die Stromstärke nicht unter einen gewissen, von der Dicke der positiven Kohle (reinste Planiakohle) abhängigen Betrag („Grenzwert“) herabsinkt.

Es kann sein, daß dieser „Grenzwert“ der Stromstärke auch noch von der Art des Gases abhängt, in welchem die Bogenlampe gebrannt wird. Beim Brennen in der freien Luft ist jedenfalls nur die Stärke des Stromes für die Erzielung des „flüssigen“ oder „festen“ verdampfenden Kraters maßgebend. Unterhalb eines

gewissen Grenzwertes wird der Krater flüssig und die Flüssigkeitsoberfläche verdampft, oberhalb dieses Grenzwertes bleibt der Krater fest und die feste Oberfläche verdampft.

In Fig. 24 ist eine photographische Momentaufnahme des positiven flüssigen Kraters beim Atmosphärendruck von 76 cm Queck-



Fig. 24.



silberdruck reproduziert. Hierbei wurde eine reinste Planiakohle (III) von 6 mm Dicke benutzt und eine Stromstärke von etwa 5 Ampère. Bei dieser geringen Stromstärke bildet sich wie bekannt nur ein relativ kleiner Krater aus. Um die ganze Kraterfläche zum Leuchten zu bringen, muß man eine größere Stromstärke verwenden, welche ihrerseits bewirkt, daß der Krater in festem Zustande verdampft.

Dabei möchte ich auf die Genauigkeit des angegebenen Zahlenwertes keinen Wert legen, da erst eine größere Anzahl

von Versuchen ergeben kann, ob jener Grenzwert der Amperes für jede Kohlenart und jede Gasart einen konstanten Wert annimmt oder nicht. Vielmehr möchte ich den Schwerpunkt lediglich auf die experimentell erwiesene Tatsache legen, daß cet. par. die Normaltemperatur des verdampfenden festen Kraters bei relativ hoher Stromstärke, die Schmelztemperatur dagegen bei abnorm kleiner Stromstärke erzielt wird, wie man sie beim gewöhnlichen Gebrauch der Bogenlampe nicht verwendet.

Der flüssige Zustand des positiven Kraters konnte auch noch bis zu Überdrucken von etwa 2 Atm. konstatiert werden. Bei noch höheren Überdrucken ist es mir bis jetzt noch nicht gelungen, den positiven Krater in flüssigem Zustande zu beobachten [1]. Schon bei Überdrucken bis zu 2 Atm. muß man recht aufmerksam sein, um das Schmelzphänomen zu beobachten, da dieses sich auch hier wie beim Atmosphärendruck nicht bei der gebräuchlichen oder gar einer größeren, sondern bei abnorm kleiner Stromstärke, also nur bei kleiner Kraterfläche einstellt.

Wie schon erwähnt, bringt nur die „kritische" Stromstärke beim „kritischen" Druck (in Luft etwa $1/2$ Atm.) die ganze Kraterfläche zum leichtflüssigen Schmelzen. Nur dem Umstande, daß diese kritische Stromstärke mit der bei gegebener Kohlendicke üblichen Stromstärke nahe übereinstimmt, verdanke ich die Entdeckung der flüssigen Kohle beim Brennen der Bogenlampe im Unterdruck! Daß dies richtig ist, geht wohl mit Sicherheit daraus hervor, daß man meines Wissens bisher noch niemals den positiven Krater bei Atmosphärendruck flüssig gesehen hat, obwohl in Vorlesungen usw., wer wollte sagen wie oft, ein vergrößertes Bild des positiven Kraters auf dem Projektionsschirm projiziert worden ist [2]. Wie oft habe ich selbst schon in meiner

---

[1]) Im Gegensatz hierzu glaubt Dr. Ludwig: „Die Schmelzung der Kohle" [Zeitschr. f. Elektrochem. 8, 273—281 (1902)] aus der Änderung des Übergangswiderstandes zwischen den zur Berührung gebrachten Kohlen einer Bogenlampe bei hohen Drucken (etwa 1600 Atm.) schließen zu dürfen, daß die Kohle an der Berührungsstelle sich verflüssigt oder gar in Diamant verwandelt habe!?

[2]) Erst kürzlich wieder ist der positive Krater unter Benutzung zweier negativer Kohlen als heller „Vollmond" bei der Versammlung der British Association in Manchester demonstriert worden, ohne daß auch nur eine Spur vom flüssigen Zustand zu bemerken war.

Vorlesung bei der Erörterung der Theorie des Flammenbogens und bei anderen Gelegenheiten diese Projektion demonstriert, ohne dabei jemals auch nur eine Spur eines flüssigen Zustandes

Fig. 25.



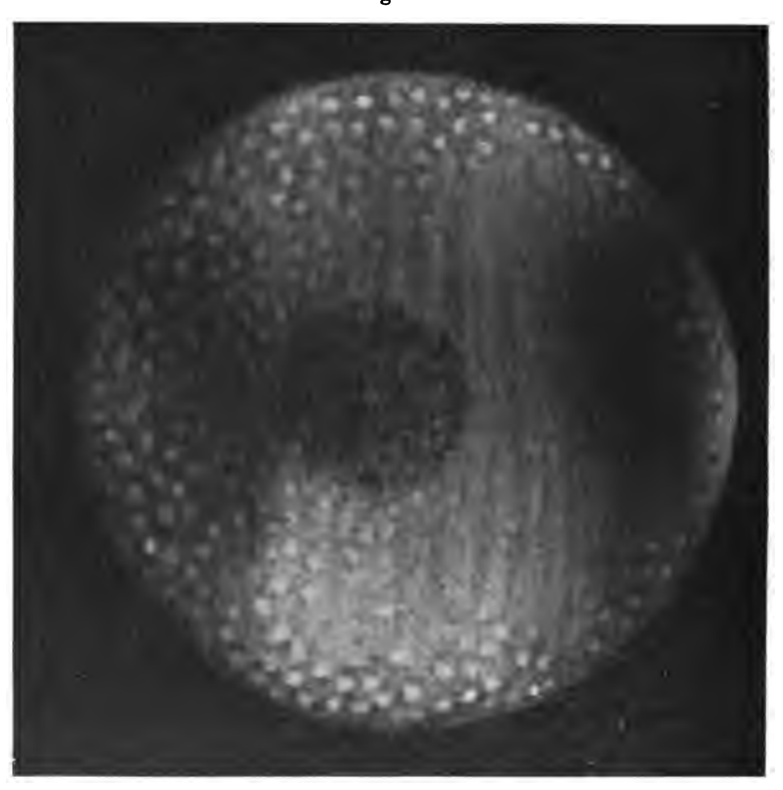
zu bemerken. Jetzt ist es leicht, den leichtflüssigen Zustand des positiven Kraters bei jeder in freier Luft brennenden Bogenlampe,

Noch schlagender ist, was mir kürzlich Herr Dr. Redlich, Chefchemiker bei den Planiawerken (Berlin und Ratibor) versicherte: Daß jedes Kohlenpaar einer jeden Kohlensorte erst in der Bogenlampe gebrannt wird, ehe es die Fabrik verläßt, wobei der Bogen bzw. der Krater vergrößert auf einem Projektionsschirm entworfen und beurteilt wird. Bei diesen nach Tausenden zählenden Versuchen ist niemals auch nur eine Spur vom Schmelzen der Kohle beobachtet worden, „trotzdem eine große elektrische Belastung" Verwendung fand (vgl. hierzu meine Kritik der Moissanschen Versuche am Schlusse des § 3).

und zwar mit allen Einzelheiten auf dem Projektionsschirm zu demonstrieren.

Hiermit ist nicht zu verwechseln, was jedem schon aufgefallen ist, der den Flammenbogen projiziert hat, daß stets der negative Krater und meist auch der positive Krater, wenigstens bei Benutzung der gebräuchlichen, ziemlich unreinen Kohlen „Blasen"

Fig. 26.

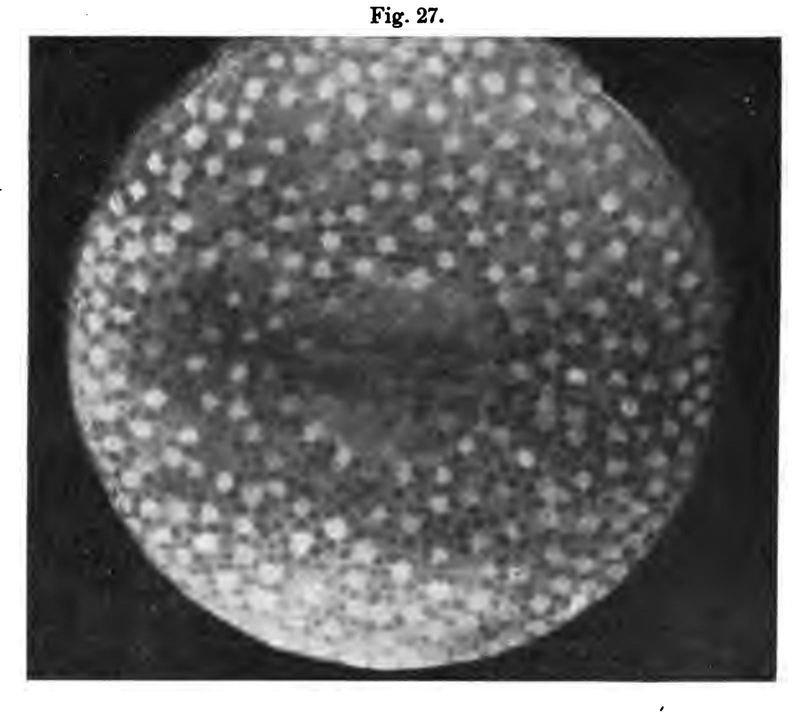


und „Schmelzperlen" produziert (vgl. Fig. 25). Diese „Schmelzerscheinung" hat nichts mit dem hier erörterten Schmelzphänomen zu tun. Diese Erscheinungen sind den Verunreinigungen der gebräuchlichen Kohlen (meistens Dochtkohlen) zuzuschreiben. Tatsächlich zeigen die reinsten Kohlen mit nur 0,07 Proz. Aschengehalt dieses Ausstoßen oder Ausschmelzen der Verunreinigungen nur in kaum merklicher Weise und stets in einiger Entfernung

von den Kratern. Dagegen ist der positive Krater auch dieser reinsten Planiakohlen (§ 23) ohne Schwierigkeit im leichtflüssigen Zustand auch beim Brennen in freier Luft zu erhalten, wenn man die Stromstärke richtig wählt. Das auftretende Schmelzphänomen ist in Fig. 24 reproduziert. Dabei betrug der Luftdruck 76 cm Hg und der Wattverbrauch bei 6 mm dicker positiver Kohle 300 Watt.

Beziehung zwischen dem Drucke und der Größe der Fische bzw. Waben. Um zu zeigen, daß bei allen Unterdrucken bis herab zu etwa $^1/_5$ Atm. der leichtflüssige Zustand mit allen Einzelheiten zu erzielen ist, und daß die Fische bzw. die zu-

Fig. 27.



gehörigen Waben mit abnehmendem Druck an Größe zunehmen, sind in den Fig. 26 bis 28 die Schmelzphänomene an ein und derselben Kohlensorte bei drei verschiedenen Unterdrucken reproduziert worden. Als positive Kohle diente eine käufliche Kohlensorte (Siemens E); die Dicke des positiven Stabes betrug 6 mm. In Fig. 26 betrug der Druck etwa 53 cm Hg; in Fig. 27 etwa $^1/_2$ Atm. und in Fig. 28 nur etwa 27 cm Hg.

Zumal aus den Fig. 26 und 27 erkennt man deutlich, daß die Größe der Fische und Waben mit zunehmendem Druck abnimmt. Aus einer großen Zahl von Beobachtungen folgt jedenfalls sicher, daß im allgemeinen die Größe der Fische und Waben recht beträchtlich mit dem Druck variiert. Es wäre aber verfrüht, aus

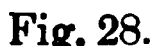
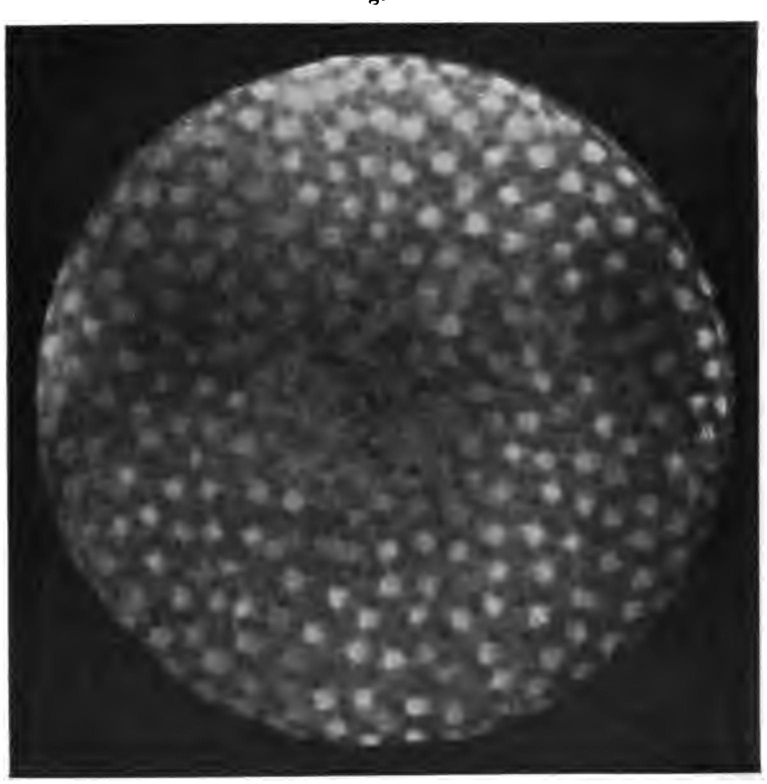


Fig. 28.

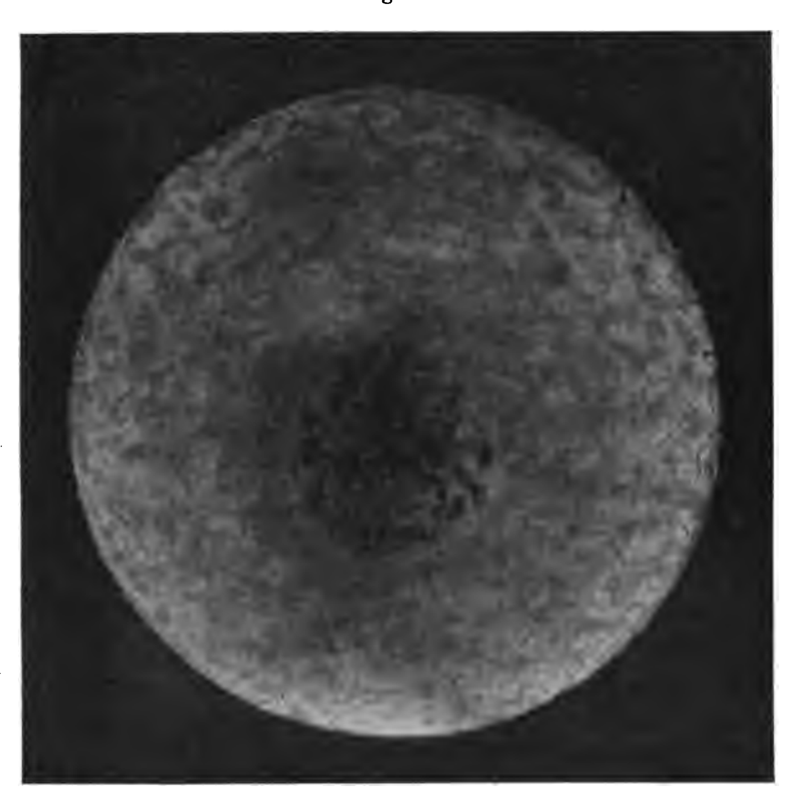


dieser Tatsache, welche bei allen Kohlensorten auftritt, weitere Schlußfolgerungen zu ziehen!

Bei einem Unterdruck von etwa $^{1}/_{5}$ Atm. ist, wie erwähnt, der leichtflüssige Zustand bei reinen Homogenkohlen nicht mehr zu erzielen. Viele Beobachtungen lehren, daß von etwa $^{1}/_{5}$ Atmosphärendruck abwärts bis zum erreichbaren niedrigsten Druck von 5 mm Hg der positive Krater bei allen Kohlen erst den „zähflüssigen“ Zustand annimmt (vgl. Fig. 29, welche das Schmelzphänomen bei

unter $^1/_5$ Atm. darstellt), dann aber bei jeder Stromstärke fest bleibt und vom festen Zustand direkt in den dampfförmigen übergeht[1]). Wie wir später kennen lernen werden, kann man den festen Zustand des Kraters bei jedem Unter- und Überdruck nach Willkür durch bloße Änderung der Stromstärke

Fig. 29.



herstellen und durch Messung der Flächenhelligkeit bzw. der Temperatur die „Temperaturkurve" bestimmen. Den leichtflüssigen Zustand kann man aber, wie erwähnt, nur innerhalb eines beschränkten Druckintervalls verwirklichen. Unterhalb $^1/_4$

[1]) Interessant ist die Mitteilung seitens einer großen Bogenlampenfabrik, daß man dort schon vor Jahren die Bogenlampe im absoluten Vakuum gebrannt, aber ebenfalls nichts von einem Flüssigwerden des Kraters bemerkt hat. Dies stimmt vollkommen mit meinen Erfahrungen überein.

und oberhalb 2 Atm. geht nach meinen bisherigen Erfahrungen die Kohle des positiven Kraters direkt aus dem festen in den dampfförmigen Zustand über.

Größe der Fische. Auch in bezug auf die Größe der Fische sind einige orientierende Messungen ausgeführt worden. Dazu wurde der Durchmesser des positiven Kohlenstabes, der Durchmesser des vergrößerten Bildes des bei etwa $^1/_2$ Atm. auf der ganzen Fläche leichtflüssigen Kraters und die Größe der Fische gemessen, so gut sich diese Messung ausführen läßt. Es mögen zwei Beispiele genügen. Bei einer Retortenkohle betrug der Kohlendurchmesser 12 mm, derjenige des Abbildes 230 mm und die Größe der abgebildeten Fische etwa 2 mm. Daraus ergibt sich die wahre Größe der Fische zu rund 0,1 mm. Bei einer gewöhnlichen Kohle betrug deren Durchmesser 9 mm, derjenige des vollen, kreisrunden, leuchtenden, positiven Kraterbildes 240 mm und die Größe der abgebildeten Fische etwa 3 mm. Daraus ergibt sich die wahre Größe der Fische zu rund 0,11 mm. Die Übereinstimmung beider „Messungen" ist besser, als man erwarten konnte. Eine größere Genauigkeit anzustreben, hat meines Erachtens keinen Zweck, zumal die Größe der Fische, wie wir sahen, eine Funktion des Druckes ist.

§ 22.

Schmelzphänomen auf dem negativen Krater der Bogenlampe beim Normaldruck.

Um auch den negativen Krater zum Schmelzen zu bringen, wurden die früher mitgeteilten Erfahrungen verwendet, welche beim Bestreben gewonnen worden waren, die Flächenhelligkeit des negativen Kraters bis auf diejenige des positiven zu steigern (§ 11). War diese Konstellation erreicht, so bedurfte es wieder nur der geeigneten Stromregulierung. um auch auf dem negativen Krater den leichtflüssigen Zustand herzustellen. In diesem Moment trat das gleiche Schmelzphänomen mit den Fischen und Waben auf, wie wir es bisher nur beim positiven Krater kennen gelernt haben.

Selbstverständlich war nach den bisherigen Kenntnissen zu erwarten, daß nicht gleichzeitig der positive Krater den flüssigen Zustand zeigen konnte, wenn es gelang, den negativen Krater zum Schmelzen zu bringen. Gemäß den früheren Erfahrungen wurde,

um das Schmelzen des negativen Kraters zu erzielen, die Handregulierungslampe (Fig. 3, S. 31) benutzt, durch welche man Ströme bis über 100 Amp. schicken konnte, als horizontale negative Kohle ein dünner Stab von nur 4 mm Durchmesser und als positive ein Stab von 10 mm Durchmesser. Außerdem wurde ein so kleiner Flammenbogen gewählt, daß die Spitze des negativen Kraters über der Mitte des viel größeren positiven Kraters lag. Erst bei Anwendung einer Stromstärke von rund 60 Amp. zeigten sich auf dem negativen Krater die ersten Spuren des Schmelzens (ein „zähes Fließen“), während bei rund 110 Amp. das leichtflüssige Schmelzphänomen mit den helleren Fischen usw. eintrat. Daß bei so starken Strömen der positive Krater eines 10 mm dicken Kohlenstabes nicht zum Schmelzen kommt, haben wir schon im Teil A genügend kennen gelernt. Eine neue und drastische Bestätigung dieses wichtigen Ergebnisses sollten auch diese Schmelzversuche am negativen Krater bringen.

Um diesen überhaupt schmelzen zu können, muß, wie oben erwähnt, eine sehr kleine Bogenlänge benutzt werden. Die Folge davon ist, daß man zugleich mit dem vollen negativen Krater auch den positiven Krater erblickt, wenn auch nur in perspektivischer Verzerrung (in „Sichelform“). Somit kann man bequem die Bedingungen studieren, unter denen bald der positive, bald der negative Krater zum Schmelzen gebracht werden kann. Wie gesagt schmilzt der negative Krater bei etwa 110 Amp.: Dann ist der positive Krater erstarrt und verdampft in festem Zustande. Um den positiven Krater zu schmelzen, muß man mit der Stromstärke bis unter etwa 15 Amp. herabgehen: Dann aber ist der negative Krater fest.

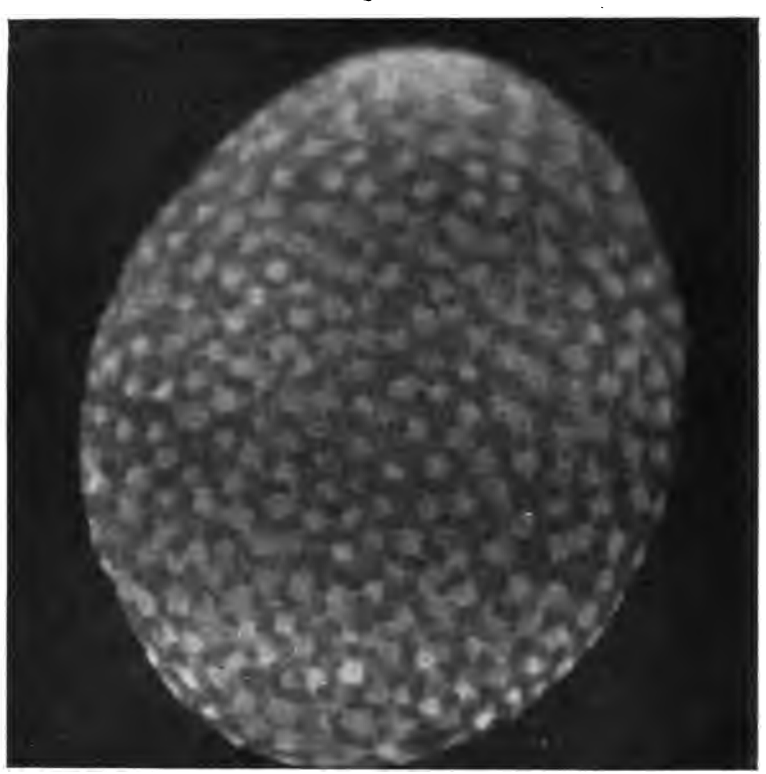
§ 23.

Schmelzphänomen bei Anwendung der verschiedensten Kohlensorten und glasklarer Diamanten.

Es wurden dem Versuche folgende Kohlensorten unterworfen: Zuerst die käuflichen und im Handel befindlichen Kohlen mit und ohne Docht; sodann sogenannte „getränkte“ Kohlen, die zum Teil ungefärbte, zum Teil gefärbte Flammenbogen geben; später die für meine Zwecke möglichst rein hergestellten Planiakohlen (I und II) und die käuflichen Graphitkohlen (sogenannte Acheson-

Graphitkohle). Dies war das Versuchsmaterial, auf Grund dessen ich meine Mitteilung in der Schles. Gesellschaft für Vaterländische Kultur machte. Später wurden noch die folgenden Kohlensorten untersucht: Retortenkohle, Holzkohle, Spektralkohle (Siemens E), eine noch reinere, für meine Zwecke hergestellte Planiakohle (III), reinster Ruß, Diamantstaub und helle,

Fig. 30.



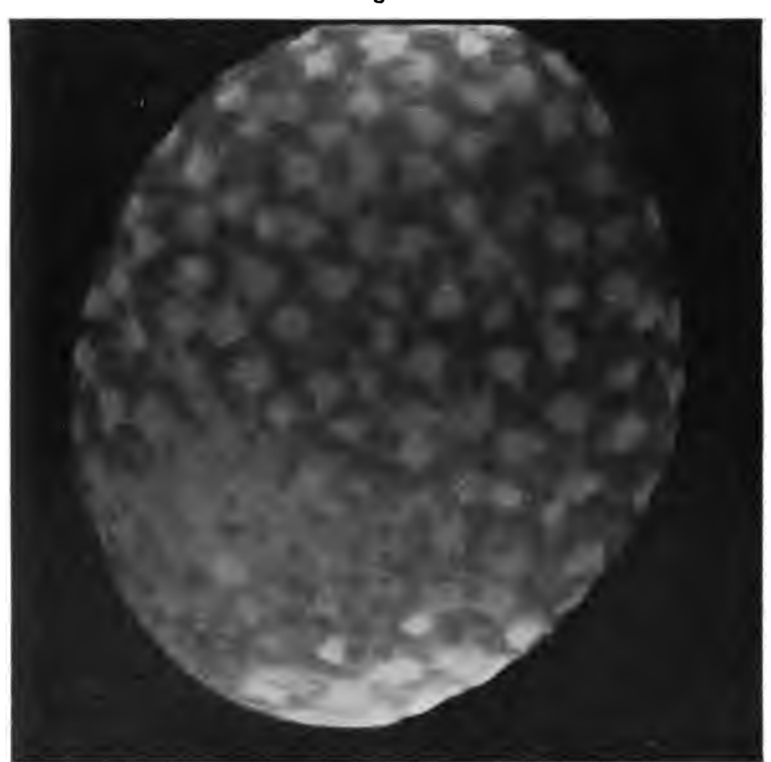
klare „reine“ Diamanten. Es werde unabhängig von der chronologischen Reihenfolge über die Versuche an den verschiedenen Kohlensorten berichtet, von denen diejenigen mit den reinsten Kohlen natürlich am wichtigsten sind. Daher wollen wir auch nur diese ausführlicher besprechen. Die Analyse der benutzten Kohlensorten, soweit sie Anspruch auf „Reinheit“ erheben können, wird im nächsten Paragraph ausführlich mitgeteilt. Über die

Verunreinigungen bzw. den Aschengehalt der benutzten Kohlen wird das Nötige gleich hier mitgeteilt werden, wenigstens soweit mir die Daten bekannt sind.

1. Retortenkohle (Aschengehalt über 3 Proz.). Die benutzte Retortenkohle war mir durch Herrn Oberingenieur Pahde[1]) aus der Gasanstalt I von Breslau besorgt worden. Die etwas



Fig. 31.

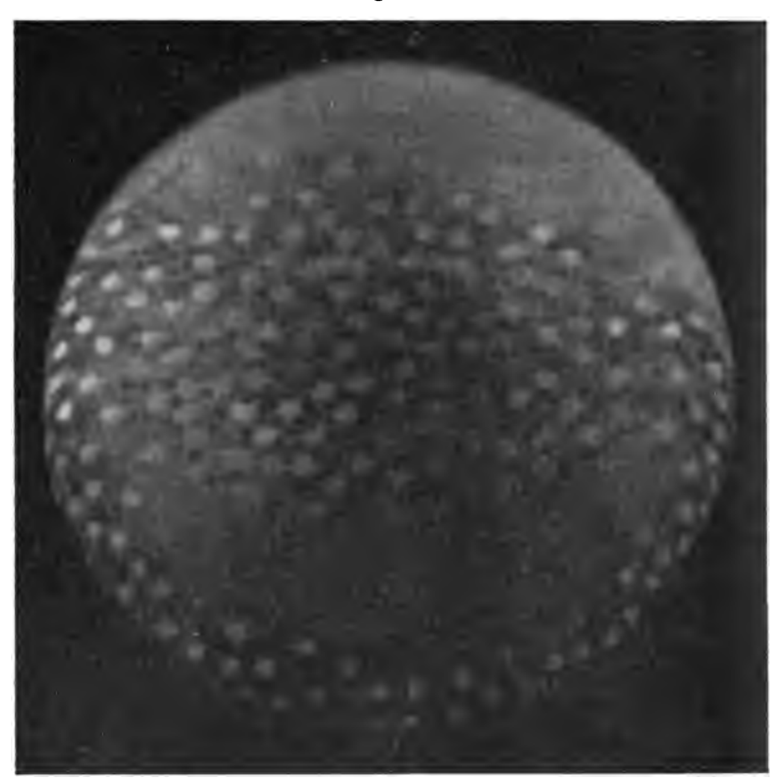


schwierige Herstellung der richtig geformten und dimensionierten Kohlenstäbe aus der graphitartig glänzenden Retorten-Kohlenmasse wurde von der Werkstatt des Breslauer Physikalischen Instituts ausgeführt. In Fig. 30 ist die Aufnahme des Schmelzphänomens

[1]) Herrn Oberingenieur Pahde möchte ich gleichzeitig auch für sein Interesse an meinen Versuchen und die liberale Unterstützung in pekuniärer Beziehung danken.

reproduziert, welches am Krater der 10 mm dicken positiven Kohle beim Druck von 32 cm Hg und beim Energieverbrauch von 1100 Watt eintrat. Außerdem wurde eine Aufnahme bei nur 18 cm Hg Druck gemacht, welche in Fig. 31 reproduziert ist. Selbst bei diesem niedrigen Druck, wo bei anderen Kohlen der flüssige Zustand kaum noch zu erzielen ist, tritt dieser bei der Retorten-

Fig. 32.

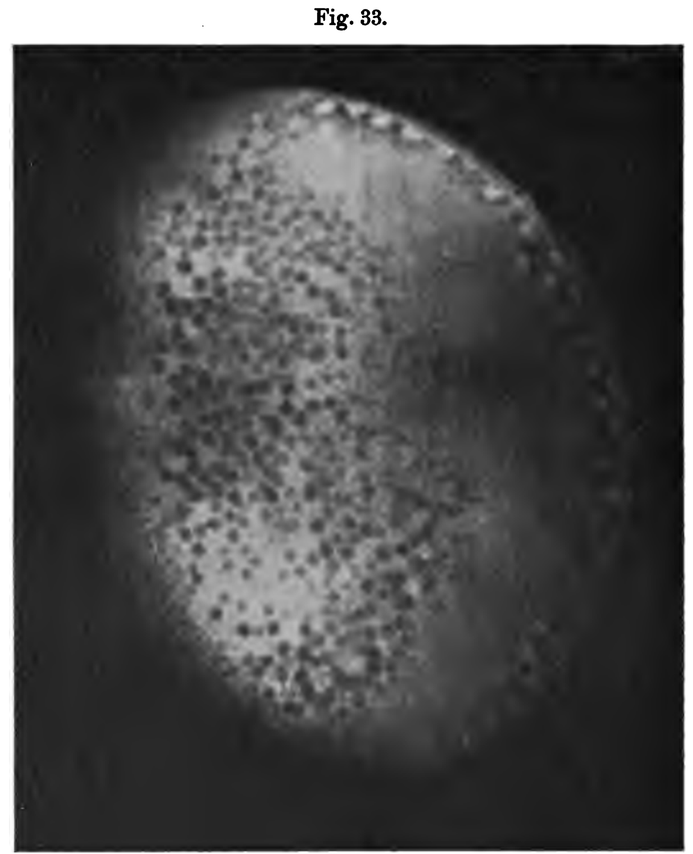


kohle noch mit größter Regelmäßigkeit auf. Deutlich erkennt man beim Vergleich beider Figuren auch hier, daß die Größe der Fische mit abnehmendem Druck zunimmt (vgl. § 21).

2. Reinste Planiakohle III. Während die von den Planiawerken gelieferte erste Sorte (Planiakohle I) einen Aschengehalt von 0,25 Proz., die zweite Sorte einen solchen von 0,15 Proz. aufwies, zeigte die zuletzt gelieferte Sorte (Planiakohle III) nur

noch den geringen Aschengehalt von 0,07 Proz. (vgl. § 25). An dem Gelingen der Herstellung dieser reinsten Kohlenstäbe bin ich nicht ganz unbeteiligt. Als ich nämlich bei einer Unterredung mit dem Direktor der Planiawerke in Ratibor, Herrn Dr. Pestalozzi, die Art der Fabrikation von Kohlenstäben kennen

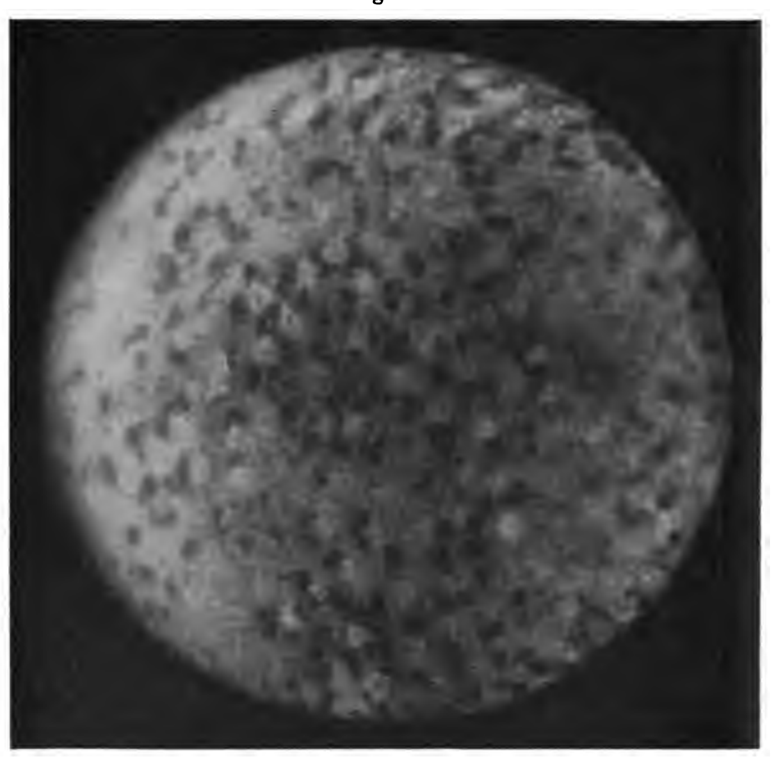
Fig. 33.



lernte und dadurch erfuhr, daß die Verunreinigungen in das viel reinere Ausgangsprodukt erst durch den Prozeß bei der Herstellung der „glasharten" Stäbe hineingebracht werden, schlug ich vor, diesen Preßprozeß mittels hydraulischer Pressen früher abzubrechen, selbst auf die Gefahr hin, weniger harte und konsistente Stäbe zu erhalten. Gemäß diesem Vorschlage wurde bei der Herstellung der Planiakohlen III verfahren.

In Fig. 32 ist die Aufnahme des Schmelzphänomens am positiven Krater einer 6 mm dicken Planiakohle III reproduziert, welches bei etwa 40 cm Hg-Druck eintrat. Auf ihr kann man deutlich die „Eisdecke“ erkennen und außerdem, daß die Fische am Rande des Kraters „festgewachsen“ sind. In Fig. 33 ist das Schmelzphänomen an der Planiakohle III bei etwa 55 cm Hg-

Fig. 34.



Druck wiedergegeben. Bei diesem relativ hohen Druck war nicht zugleich der ganze Krater in leichtflüssigen Zustand zu versetzen.

3. Acheson-Graphitkohle. Als positiver Stab diente ein 6 mm dicker Kohlenstab, als negativer ein 4,5 mm dicker Stab. Wie mir die Acheson Graphit Company mitteilte, sind ihres Wissens bisher diese Graphitkohlen überhaupt noch nicht in Bogenlampen gebrannt worden, vielleicht weil sie teurer als die gewöhnlichen Kohlen sind und den Strom zu gut leiten. Daher konnte ich

auch keine Stäbe von richtiger Dimensionierung erhalten, so daß das benutzte Kohlenpaar ungleich abbrannte. Durch wiederholte Vertauschung der Pole wurde für möglichst gleichen Abbrand beider Kohlen gesorgt, wie bei allen Kohlenpaaren, welche nicht richtig abbrannten.

In Fig. 34 ist die Aufnahme des Schmelzphänomens reproduziert, welches beim Druck von 36 cm Hg und bei einem Energieverbrauch von 1100 Watt eintrat.

Zumal beim Atmosphärendruck brennen die Kohlen nach dem Zünden der Lampe zunächst sehr unruhig, und der Bogen „arbeitet“ so, daß man anfangs glaubt, es würde sich überhaupt kein ruhiger und stationärer Zustand einstellen. Nach Verlauf einiger Zeit tritt dies aber doch ein und bei genügend schwachem Strom kommt auch der positive Krater der bei Atmosphärendruck brennenden Lampe zum Schmelzen, das übliche Schmelzphänomen zeigend.

Beim Brennen der Graphitkohlen im Unterdruck machen sich andere „Unarten“ dieser Kohlen bemerkbar, insofern sie leuchtende Kohlenteilchen in großer Zahl mit Heftigkeit fortschleudern, so daß eine Art Brillant-Feuerwerk entsteht. Inmitten dieser „Sternschnuppenschwärme“ steht als „ruhender Pol“ das Bild des leichtflüssigen Kraters auf dem Gipsschirm. Es ist dies deswegen erwähnenswert, weil es zeigt, daß man es auch deutlich beobachten können müßte, falls einer der Fische aus dem Flüssigkeitsteiche herausspringen oder als „Schaumbläschen“ (vgl. Vorwort) zerplatzen würde.

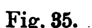
4. Holzkohle. Ich verschaffte mir Holzkohle in Gestalt von mehr oder weniger geraden Stäben geeigneter Dicke, wie sie zum Zeichnen verwendet werden. Da diese Stäbe nichtleitend sind, so ließ ich sie galvanoplastisch mit Kupfer tränken und überziehen. Dieser Weg führte aber nicht zu dem gewünschten Ziele. Es wurde daher die folgende Anordnung[1]) gewählt, und zwar mit vollem Erfolge. In eins der dünnwandigen Kohlenrohre, wie ich sie zur Temperaturbestimmung der Kohlenfäden in den Glüh-

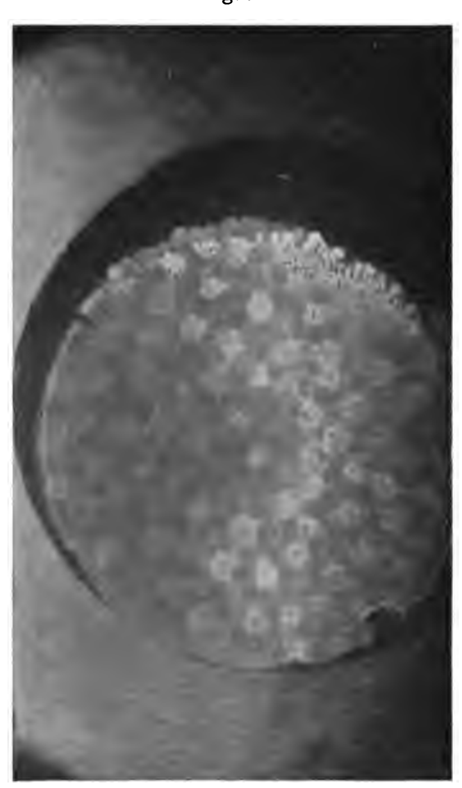
---

[1]) Diese Anordnung wurde von Paul Scholz, Maschinist und Institutsdiener, vorgeschlagen, welchem ich nicht nur für seine unermüdliche und begeisterte Mitarbeit und Hilfe bei allen Versuchen, Aufnahmen usw. zu großem Danke verpflichtet bin, sondern ganz besonders für seine wertvollen Ratschläge in technischen Dingen.

lampen verwendet hatte (§ 12), wurde das passend geschnittene Stäbchen aus Holzkohle eingefügt und als positive Kohle benutzt. Als vertikale negative Elektrode diente eine gewöhnliche Kohle von solcher Dicke, daß der Abbrand ein möglichst gleichmäßiger war.

Beim Schließen des Stromes im Unterdruck von etwa $^1/_2$ Atm. glühte zuerst der vordere Rand des positiven Kohlenrohres und kam bald da, bald dort, und bei geeigneter Stromstärke manchmal auf der ganzen Randfläche zum Schmelzen. Dann biß der Flammenbogen auch an der Holzkohle an[1]) und erzeugte auf ihrer Stirnfläche das bekannte Schmelzphänomen. In Fig. 35 ist die Aufnahme des Schmelzphänomens wiedergegeben, welches bei 28 cm Hg-Druck und beim Energieverbrauch von 820 Watt erhalten wurde. Dieses Phänomen zeigt einige Besonderheiten: Die Fische haben auffallend viele Schmelzstellen (die dunklen Stellen bzw. Löcher in jedem Fisch) und ihre Anordnung scheint im Zusammenhang mit der faserigen Struktur der Holzkohle zu stehen, die man meines Erachtens durch die Flüssigkeit hindurchschimmern sieht. Außerdem haben sich am Rande der Holzkohle geschmolzene „Klumpen“ von Kohle (?) gebildet. An einer


Fig. 35.

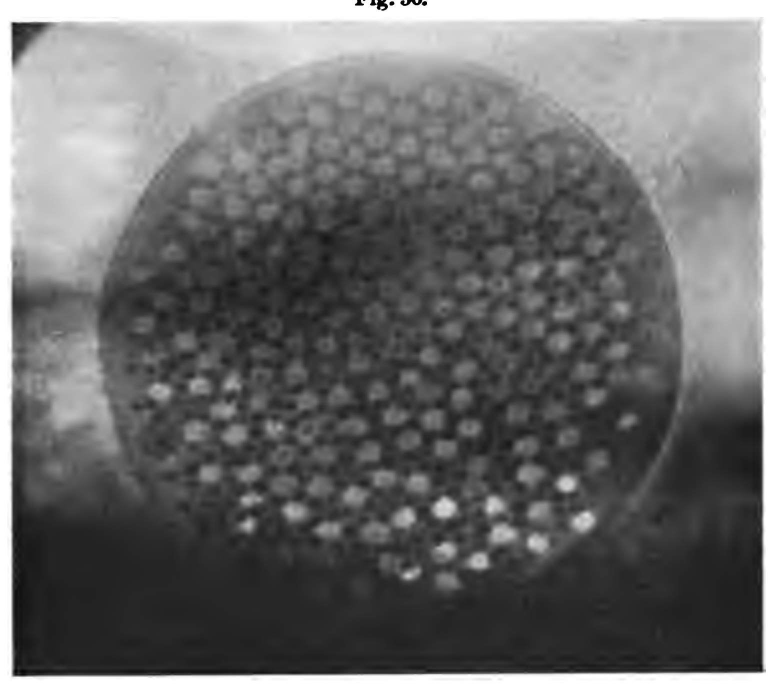


[1]) Jedenfalls nachdem sich die Holzkohle in Graphit verwandelt hatte.

Stelle sind übrigens auch die Fische auf dem flüssigen Rande des Kohlenrohres zu erkennen. Leider ist gerade bei der Momentaufnahme nicht der ganze Kohlenrand zum Schmelzen gekommen.

5. Reinster Ruß (Aschengehalt etwa 0,02 Proz.). Dieser von der Firma Gebrüder Siemens in Lichtenberg besonders rein hergestellte „Ruß“ ist aus gereinigtem Teeröl gewonnen. Um ihn dem Schmelzprozeß zu unterwerfen, wurde er in ein

Fig. 36.



Kohlenröhrchen aus „Spektralkohle“ gepreßt; im übrigen wurde ganz wie beim Schmelzen der Holzkohle verfahren. In Fig. 36 ist die Aufnahme des Schmelzphänomens reproduziert, welches bei 32 cm Hg-Druck erzielt wurde. Auch hier sieht man die Fische auf dem Rande des Kohlenrohres, wenn auch nur schwer erkenntlich. Die Schmelzstellen in den Fischen der flüssigen Rußoberfläche sind meist zentral gelegen und relativ groß. Im übrigen weicht aber das Schmelzphänomen in keiner Hinsicht von demjenigen bei den anderen Kohlensorten ab.

6. Reine Diamanten. Daß die Schmelze bei den Kohlen, am Ruß usw. flüssiger reiner Kohlenstoff ist, dafür kann freilich das Schmelzen auch der reinsten Diamanten keinen Beweis erbringen. Immerhin dürfte dieser Schluß an Wahrscheinlichkeit gewinnen, wenn das Schmelzphänomen an glasklaren Diamanten wieder das am reinsten Ruß oder an den reinsten Kohlen beobachtete Aussehen usw. hat. Aus diesem Grunde unternahm ich auch Schmelzversuche am Diamant, um so mehr, als es gelungen war, auch die nichtleitende Holzkohle zu schmelzen.

Die Diamanten wurden mir in liebenswürdiger Weise von der Breslauer Diamant-Ziehanstalt bzw. von deren Chefingenieur Herrn Diener kostenlos zur Verfügung gestellt. Es waren hellklare und reine Brasilianer bis zu 3 Karat (1 Karat = 0,2 g) Größe.

Nach mehreren vergeblichen Versuchen, bei denen der in ein Kohlenröhrchen gesteckte Diamant zersprang oder sich zu größerem Volumen aufblähte oder nicht die leichtflüssigen Schmelzerscheinungen zeigte, führten die folgendermaßen angestellten Versuche zum Ziel.

Ich ließ eine Planiakohle III am vorderen Ende ausbohren und in diese Höhlung kleinere und größere Diamanten hineinstecken, so zwar, daß der letzte größere, klare und homogene Diamant noch im Inneren der Kohlenbohrung sich befand und das äußere Ende der Kohle als Kohlenrohr hervorragte.

Um die Oxydation bzw. Verbrennung nach Möglichkeit auszuschließen, wurde der Schmelzversuch in reinem Stickstoff angestellt und noch vor Stromschluß der Druck auf etwa $^1/_2$ Atm. erniedrigt. Sobald der Strom geschlossen wurde, kam zunächst das hervorragende Kohlenrohr zum Schmelzen, das leichtflüssige gewohnte Schmelzphänomen zeigend. In diesem Zustande verblieb die Kohle, bis sie so weit verdampft war, daß der erste Diamant zum Vorschein kam. Sobald die Oberfläche des Diamanten und seine Konturen auf dem Gipsschirm deutlich gesehen wurden, während der rings ihn umhüllende Kohlenrand das leichtflüssige Schmelzphänomen zeigte, biß auch der Flammenbogen am Diamanten an und brachte diesen zum Schmelzen. Anfangs war der leichtflüssige Diamantteich nur klein, nahm aber stetig an Ausdehnung zu und zeigte das gewohnte Bild: In ihm tummelten sich die Fische, von Wabe zu Wabe eilend, wobei sie nach

Helligkeit und Größe sich in nichts von den Fischen im Teiche auf dem Kohlenrohr unterschieden.

Fig. 37.



Fig. 38.



Da die beiden Teiche, derjenige auf der Diamantoberfläche und der ringförmige auf dem Kohlenrande, durch eine dunkle Zone getrennt waren, so war man auch sicher, daß nichts vom flüssigen Kohlenrande hinüber zur Diamantfläche geflossen war bzw. floß. Schließlich hatten sich die beiden Teiche so weit ausgebildet, daß sie nur noch durch eine scharfe dunkle kreisförmige Trennungslinie (der inneren Peripherie des Kohlenrohres) getrennt waren.

Mit der Zeit nahm das Schmelzphänomen auf dem Diamanten ein anderes Aussehen an, wie man es meist beim Schmelzen der Dochtfläche einer „Dochtkohle“ beobachtet und wie es aus Fig. 26 bzw. Fig. 27 zu ersehen ist. Dieses „Schneeschmelzen“ kann man am besten nachahmen, wenn man auf eine im Schmelzen begriffene Schnee- oder Eisfläche da und dort heißes Wasser tropfen läßt.

Das glückliche Gelingen des leichtflüssigen Schmelzphänomens auf einem wasserklaren Diamanten ist wohl lediglich dem Um-

stande zu verdanken, daß der Diamant sich während des Schmelzens und Verdampfens der Kohle hatte vorwärmen und oberflächlich in Graphit verwandeln können. Tatsächlich waren die kleineren, hinter dem großen Diamanten befindlich gewesenen Diamanten nach Beendigung des Versuches mit einer bräunlichen „Haut" überzogen, die auch durch stärkstes Reiben nicht abgewischt werden konnte. Vom geschmolzenen großen Diamanten war der übrig gebliebene Teil noch ganz und ebenfalls mit einer solchen „Graphithaut" überzogen.



Fig. 39.

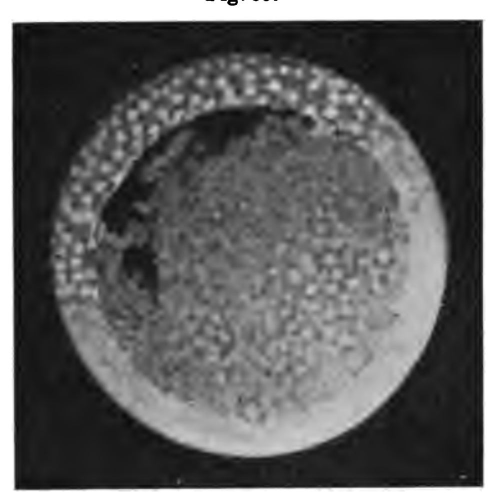


Fig. 40.



Leider waren wir bei diesem wohlgelungenen Schmelzversuch noch nicht auf das Photographieren des Schmelzphänomens eingerichtet. Die Aufnahmen einiger späteren Schmelzversuche, bei denen ein größerer glasklarer Diamant in Diamantsplitter eingebettet war, die ihrerseits das Kohlenröhrchen ausfüllten, sind leider nicht ganz so schön ausgefallen, wie der soeben beschriebene Versuch. Die hierbei erhaltenen Schmelzphänomene sind in Fig. 37 und 38 reproduziert. Man sieht deutlich die Fische auf dem Diamanten

und gleichzeitig diejenigen auf dem Rande des Kohlenröhrchens. Nach Beendigung des Versuches überzeugte man sich, daß im Kohlenröhrchen noch eine 1 mm dicke Schicht unversehrter Diamantsplitter vorhanden war.

In den Fig. 39 und 40 ist auch das an „Diamantstaub“ erhaltene Schmelzphänomen reproduziert. Dieser Diamantstaub war durch Zerkleinern glasklarer Diamanten erhalten worden.

§ 24.

Schmelzphänomen in verschiedenen Gasen.

Hauptsächlich kam es darauf an, nachzuweisen, daß die am Krater der Bogenlampe auftretende Schmelzflüssigkeit geschmolzener reiner Kohlenstoff sei. Da von seiten der Chemiker mit Recht Wert darauf gelegt worden war, das Schmelzphänomen auch in anderen Gasen statt in Luft auszuführen, so stellte ich Schmelzversuche in Stickstoff, Sauerstoff und Kohlendioxyd an.

a) Stickstoff. Solange die Schmelzversuche an den verschiedensten Kohlensorten nur in Luft angestellt worden waren, hätte es immerhin möglich sein können, daß sich der Stickstoff der Luft mit dem Kohlenstoff der Kohle zu einer Verbindung vereinigte und daß die flüssige Schmelze nicht der Kohlenstoff, sondern diese Verbindung in flüssigem Zustande sei. M. E. waren die Versuche im Stickstoff überflüssig, da bei längerem Brennen der Bogenlampe im abgeschlossenen Gefäß von der Luft bald genug nur noch der Stickstoff übrig bleiben dürfte. Immerhin hätte doch im Anfang das Schmelzphänomen ein anderes sein können, wenn man vom Beginn an Stickstoff statt der Luft benutzte. Ich füllte daher das Gefäß vor Beginn des Versuches mit nahezu reinem Stickstoff, welchen ich einer von Elkan, Berlin gelieferten „Stickstoffbombe“ entnahm. Da das Schmelzphänomen in keiner Hinsicht von demjenigen in Luft abwich, so erübrigte es sich meines Erachtens, den käuflichen Stickstoff zu reinigen.

b) Kohlendioxyd. Um die letzten Spuren des in der Luft enthaltenen Stickstoffs aus dem etwa 30 Liter fassenden Gefäß zu entfernen, wurde dasselbe sechsmal bis auf etwa 3 mm Hg-Druck ausgepumpt und nach jeder Evakuation mit Kohlensäure aus einer käuflichen Kohlensäurebombe gefüllt. Der Stickstoff

der anfänglichen Luftfüllung war dann so gut wie vollständig aus dem Gefäß entfernt.

Auch in dieser Kohlensäureatmosphäre bietet das Schmelzphänomen nichts Neues. Ich hielt es daher auch hier für überflüssig, die käufliche Kohlensäure zu reinigen.

Diese Versuche wurden angestellt, noch ehe es gelungen war, den leichtflüssigen Schmelzzustand auch bei anderen Drucken als bei etwa $^1/_2$ Atm. herzustellen. Als man das Gefäß mit Kohlensäure gefüllt hatte, wurde also auch jetzt der Druck von etwa 37 cm Hg hergestellt und die Lampe gezündet unter Verwendung des bei der benutzten Kohle notwendigen „Schmelzstromes", d. h. der kritischen Stromstärke (vgl. § 19). Merkwürdigerweise blieb das Phänomen aus und trat erst auf, als der Druck erniedrigt worden war.

Annähernd verhielten sich die beiden Drucke, bei denen die ganze Kraterfläche das leichtflüssige Schmelzphänomen in Luft bzw. in Kohlensäure zeigt, wie die Wärmeleitvermögen beider Gase. Mag auch der Zufall hierbei mitgespielt haben, jedenfalls war die gemachte Erfahrung für mich so entscheidend, daß ich von jenem Tage ab die Überzeugung gewann, es nicht mit dem Siedevorgang, sondern mit dem Schmelzvorgang zu tun zu haben.

Mag diese Schlußfolgerung richtig sein oder nicht, jedenfalls waren diese Beobachtungen die Ursache, daß ich von jener Zeit ab eifrig danach suchte, den leichtflüssigen Zustand bei allen möglichen Drucken lediglich durch Variation der Stromstärke zu verwirklichen und zwar mit Erfolg (siehe § 21).

c) Sauerstoff. Auch die in Sauerstoff angestellten Schmelzversuche lehrten nichts Neues, so daß es sich auch hier erübrigte, den einer Sauerstoffbombe entnommenen Sauerstoff erst noch zu reinigen.

§ 25.

Analyse der verwendeten reinsten Kohlen in bezug auf Aschengehalt.

Ehe wir auf die Bestimmung des Aschengehaltes fertiger Kohlenstäbe oder des zu ihrer Herstellung benutzten Rohproduktes (Ruß) eingehen, werde über die Herstellung der Kohlenstäbe selbst einiges mitgeteilt. Auf meine Anfrage bei den

Planiawerken in Ratibor erhielt ich folgenden Bescheid. Das Ausgangsprodukt ist Ruß, welcher durch Verbrennen von Teeröl bei beschränktem Luftzutritt gewonnen wird und im allgemeinen einen Aschengehalt von etwa 0,03 Proz. aufweist. „Zur Herstellung der Ihnen zur Verfügung gestellten Kohlen wurde jeweilig ein besonders aschenarmer Ruß ausgewählt, dessen Aschengehalt (durch Analyse vor der Verwendung festgestellt) stets unter 0,01 Proz. lag. Zucker kann uns keine reineren Kohlen geben, da derselbe unreiner ist“[1]).

Erst durch die Bearbeitung dieses relativ reinen Ausgangsproduktes (beim Pressen und Brennen), um daraus glasharte Kohlenstäbe zu fertigen, kommen unvermeidlich neue Verunreinigungen dazu. Die Bearbeitung geschieht wie folgt. Der aus Teeröl gewonnene Ruß wird mit Teer als Bindemittel behandelt und dann bei sehr hohem Druck (etwa 1000 Atm.) gepreßt. Hierauf werden die Kohlen calciniert, um die flüchtigen Bestandteile des Teers zu verdampfen: „Der Koks des Teers bindet dann den Ruß zu einem festen Körper. Das Erhitzen (Calcinieren)

Tabelle VI.

Datum	Durchmesser mm	Kohlen g	Asche g	Prozentgehalt
16. Dez. 1913	14,5	2,0000	0,0017	0,085
17. „ „	6,0	2,0000	0,0018	0,090
18. „ „	10,5	2,0000	0,0002	0,010
29. „ „	4,5	1,0352	0,0005	0,048
29. „ „	6,0	2,3352	0,0015	0,063
29. „ „	10,5	5,1088	0,0029	0,057
29. „ „	14,5	3,8663	0,0015	0,039
14. Jan. 1914	14,5	6,3440	0,0102	0,161
3. März „	4,5	4,3836	0,0036	0,082
3. „ „	6,0	4,4822	0,0033	0,074
3. „ „	10,5	3,7397	0,0031	0,083
3. „ „	14,5	5,2108	0,0060	0,115
4. „ „	4,5	4,0325	0,0045	0,113
4. „ „	6,0	6,5817	0,0035	0,053
4. „ „	10,5	9,5853	0,0053	0,055
4. „ „	14,5	18,6972	0,0117	0,063
			Mittel	0,075

[1]) Hiernach war ich der Schmelzversuche an „Zuckerkohlen“ überhoben, welche meist als die reinsten Kohlen bezeichnet werden.

muß allmählich geschehen bis zu einer Temperatur von 1300°. Ebenso muß das Abkühlen langsam vor sich gehen, damit die Stäbe nicht reißen. Dieser Prozeß dauert etwa 8 Tage."

In der vorstehenden Tabelle VI sind die Resultate von 16 Analysen mitgeteilt, welche an den Planiakohlen III (mir übersandt am 7. März 1913) vom Werk selbst ausgeführt worden sind, und zwar zu verschiedenen Zeiten (erste Vertikalreihe), an verschieden dicken Kohlen (zweite Vertikalreihe) und mit Benutzung verschieden großer Kohlenstabmengen (dritte Vertikalreihe).

Man ersieht aus dieser Tabelle, daß der Aschengehalt von Stab zu Stab sich ändert und daß manche Stäbe noch unter 0,07 Proz. Aschengehalt aufweisen. Es dürften bisher wohl kaum reinere glasharte Kohlenstäbe hergestellt worden sein[1]).

Was die Methode der Bestimmung des Aschengehaltes betrifft, so schreiben die Planiawerke unter dem 7. März 1914:

„Etwa 5 bis 10 g werden in großen Stücken im ausgeglühten und tarierten Platinschiffchen genau eingewogen und in der geheizten Schamottemuffel oder im elektrischen Ofen mit Luftzuführung bei etwa 900° bis zur Gewichtskonstanz des Rückstandes verbrannt. Der im Platinschiffchen verbleibende Rückstand ist die Asche, welche der Kohlenstift enthält. Versuchsfehler sind bei dieser Methode für das jeweilig analysierte Stück so gut wie unmöglich; das schließt jedoch nicht aus, daß verschiedene Stücke verschiedenen Aschengehalt aufweisen, da wir es mit einem fabrikmäßig im großen hergestellten Produkt zu tun haben."

In bezug auf den Aschengehalt sagen die Planiawerke folgendes aus:

„Die so erhaltene Asche besteht zum größten Teil aus Kieselsäure (etwa 45 Proz.), ferner aus Eisen und Eisenoxyd (etwa 40 Proz.) und der Rest aus Erd- und anderen Alkalien; das sind alles diejenigen Bestandteile, die

1. durch die Rohmaterialien bedingt sind (SiO_2, CaO, Alkalien),
2. durch die Fabrikation (Fe) in das fertige Produkt gelangen.

Eine genaue Analyse würde längere Zeit beanspruchen, da mindestens 500 g (= 20 Kohlen von 14,5 mm) dieser Kohlen

[1]) Die reinsten Kohlenstäbe, welche La Rosa zur Verfügung hatte, wiesen einen Aschengehalt von 0,33 Proz. auf (§ 5).

nach und nach verascht werden müssen, um eine einigermaßen genügende Menge Asche für die Analyse zu erhalten."

Aus verschiedenen Gründen lag mir daran, diese Analysen in meinem Institut ausführen zu lassen, namentlich um meine Vermutung prüfen zu können, daß sich die positive Kohle beim Brennen in der Bogenlampe von selbst reinigt (§ 26). Die von uns angewandte Methode zur Bestimmung des Aschengehaltes war die folgende.

Die zu untersuchende Kohle wird möglichst in einem Stück, das oberflächlich abgeschabt ist, in ein bis zur Gewichtskonstanz geglühtes Porzellanschiffchen eingewogen. Dieses Schiffchen wird in ein Porzellanrohr eingeführt, das sich in einem Verbrennungsofen befindet. In diesem wird das Porzellanrohr seiner ganzen Länge nach erhitzt; Schamottekacheln zu beiden Seiten des Rohres sorgen für gleichmäßige Temperatur. Die „schwarze" Temperatur im Inneren des Rohres wurde mittels des Holborn-Kurlbaumschen Pyrometers gemessen, sie betrug 850° C, ist also völlig ausreichend. Durch das Rohr wird ein ziemlich lebhafter Sauerstoffstrom geleitet. Die Verbrennung tritt bald ein und ist nach etwa zwei Stunden beendet. Nach vier Stunden wurde das Schiffchen aus dem Rohr herausgenommen und nach dem Erkalten gewogen. Dann wurde es nochmals in das Verbrennungsrohr eingeführt, nochmals erhitzt und Sauerstoff durchgeleitet. Nach einer Stunde wurde es herausgenommen und nach dem Erkalten gewogen. Die Gewichtsdifferenz zwischen dem leeren Schiffchen und dem Schiffchen nach der Verbrennung ergab die Asche in Gramm. Daraus wurde der Prozentgehalt der Kohle an Asche berechnet. Da es sich herausgestellt hatte, daß das Gewicht des Schiffchens nach der eigentlichen Analyse und nach dem zweiten Erhitzen das gleiche war, wurde bei den späteren Analysen das zweite Glühen weggelassen.

In der Tabelle VII sind die Resultate der Analysen an den reinsten Planiakohlen III mitgeteilt. Man ersieht aus ihr, daß unsere Analysen im Mittel fast den gleichen geringen Aschengehalt liefern, wie die der Planiawerke. Abgesehen von der ersten Analyse sind die Abweichungen unter den Einzelwerten geringer als in Tabelle VI, S. 107. Bei dieser ersten Analyse ist der Kohlenstab erst im Mörser zerkleinert worden, bei den übrigen wurde, wie oben geschildert, das nicht zerkleinerte Kohlenstück als Ganzes der Verbrennung unterworfen.

Tabelle VII.

Nr.	Durchmesser der verwandten Kohlenstäbe mm	Verbrannte Substanzmenge g	Asche g	Asche Proz.
1	14,5	2,0154	0,0043	0,21(3)
2	14,5	3,4129	0,0029	0,08(5)
3	14,5	3,6009	0,0025	0,06(9)
4	10,5	12,3439	0,0104	0,08(6)
5	10,5	6,7561	0,0043	0,06(4)
6	10,5	6,6378	0,0027	0,04(1)
7	10,5	6,3582	0,0054	0,08(5)
8	10,5	5,8019	0,0043	0,07(4)
9	10,5	6,1730	0,0037	0,06(0)
10	10,5	6,0745	0,0031	0,05(1)
11	6	5,8495	0,0055	0,09(4)
12	6	6,1510	0,0041	0,06(7)
13	6	6,0515	0,0048	0,07(9)
14	6	5,7809	0,0046	0,07(9)
15	6	5,6492	0,0042	0,07(4)
16	4,5	3,3796	0,0019	0,05(6)
17	4,5	3,3790	0,0024	0,07(1)
18	4,5	3,1296	0,0021	0,06(7)
19	4,5	3,2484	0,0018	0,05(5)

Sämtliche 19 Analysen ergeben im Mittel 0,077 Proz. Aschengehalt; schließen wir die erste Analyse aus, so wird der Mittelwert 0,069 Proz.

Aschengehalt des geschmolzenen Rußes. Auch der von Gebr. Siemens gelieferte reinste Ruß wurde einer nochmaligen Analyse unterzogen. Nach den Mitteilungen seitens des Lieferanten hat dieser Ruß nur 0,02 Proz. Aschengehalt, nach unseren Analysen beträgt derselbe eher noch etwas weniger als 0,02 Proz.

§ 26.

Selbstreinigung der Bogenlampenkohlen durch den Flammenbogen in bezug auf ihren Aschengehalt.

Ist die Schmelze auf dem positiven Krater einer niemals absolut rein zu erhaltenden Kohle wirklich flüssiger reiner Kohlenstoff, so muß man schließen, daß beim Brennen der Bogen-

lampe eine Art Selbstreinigungsprozeß stattfindet. Auf Grund dieser hypothetischen Folgerung wurden die reinsten Planiakohlen, nachdem sie längere Zeit im Bogen gebrannt hatten, einer nochmaligen Analyse in bezug auf ihren Aschengehalt unterzogen, natürlich nur diejenigen Stückchen, welche am Ende der positiven Kohle einen hohen Hitzegrad erreicht hatten. Hierbei wurde folgendermaßen verfahren.

Die reinste Planiakohle III wurde als positive Kohle der Bogenlampe verwendet und im Lichtbogen bei einer Stromstärke von etwa 30 Amp. während einiger Minuten geglüht. Da die Dicke der positiven Kohle 10,5 mm betrug und die Lampe bei Atmosphärendruck brannte, so konnte bei so großer Stromstärke der Krater den flüssigen Zustand nicht annehmen. Doch ist hierauf nicht besonders geachtet worden.

Nach einigen Minuten des Brennens wurde der Strom ausgeschaltet und die positive Kohle vorsichtig aus der Lampe genommen. Der positive Krater zeigte dann folgendes Aussehen: Die äußerste Spitze erschien in einer Länge von 2 bis 3 mm tiefschwarz. Auf dieses tiefschwarze Stückchen folgte eine Zone von etwa $^1/_2$ mm Länge, welche rings mit einem weißlichen, leicht an der Kohle haftenden „Aschenkranz" bedeckt war.

Die äußerste tiefschwarze Spitze wurde mit einer gut gereinigten Säge abgesägt und in der im vorigen Paragraphen beschriebenen Weise der Analyse auf ihren Aschengehalt unterworfen. Natürlich wurde, um die genügende Kohlenmenge für die Analyse zu erhalten, dieser Prozeß (Brennen und Absägen) mehrmals wiederholt. In der folgenden Tabelle sind die so erhaltenen Resultate angegeben. In der ersten Vertikalreihe ist der Prozentgehalt an Asche angegeben, welchen der benutzte Kohlenstab (Plania III) besaß; in der zweiten Reihe das Gewicht der abgesägten Kohlenmenge;

Tabelle VIII.

Aschengehalt der Planiakohle III Proz.	Gewicht der abgesägten Stücke g	Gewicht der Asche g	Aschengehalt Proz.
0,066	1,2243	0,0003	0,024
0,066	3,8191	0,0009	0,024
0,098	2,2135	0,0008	0,037
0,078	3,1759	0,0009	0,028

in der dritten das Gewicht der von dieser gelieferten Asche und in der letzten Reihe der Prozentgehalt an Asche der im Bogen ausgeglühten und abgesägten Kohlenstückchen.

Als bei einer Versuchsreihe der Strom der Bogenlampe bei 6 mm dicker Kohle auf 60 Amp. erhöht wurde, ergab die Analyse der ausgeglühten Kohlenenden sogar unter 0,01 Proz. Aschengehalt.

Wegen der geringen Aschenmengen macht sich der Fehler der Methode, welcher etwa 0,01 Proz. beträgt, verhältnismäßig stark bemerkbar. Immerhin darf man die erhaltenen Resultate in bezug auf die Größenordnung als richtig betrachten. Aus diesen folgt demnach deutlich, daß sich die Planiakohlen durch das Brennen als positive Kohlen in der Bogenlampe von selbst gereinigt haben und mindestens ebenso rein geworden sind als das zur Fabrikation benutzte Ausgangsprodukt. Denn das Ausgangsprodukt soll einen Aschengehalt von etwa 0,01 Proz. besessen haben.

Aus diesem Befunde schloß ich, daß auch die im Verbrennungsofen bei der Analyse der rohen Kohlenstäbe erhaltene „Asche" bei nochmaliger höherer Erhitzung auf eine kleinere Gewichtsmenge reduziert werden dürfte. Um wenigstens ein vorläufiges Urteil über die Richtigkeit dieser Folgerung zu gewinnen, wurde die im Verbrennungsofen bei etwa 850° erhaltene Asche in einem Platinschiffchen bei etwa 1500° im Kryptolofen einer nochmaligen Verbrennung unterworfen. Tatsächlich konnte eine Reduktion der erstmalig erhaltenen Asche sicher konstatiert werden, woraus man wohl schließen darf, daß auch dieser Aschengehalt bei einem zweiten Verbrennungsprozeß in einem Ofen von noch höherer Temperatur noch weiter reduziert werden dürfte.

§ 27.

Analyse des Erstarrungsproduktes.

Eins meiner Hauptargumente, welche ich im Vortrag für die Behauptung ins Feld führte, daß die Schmelze auf dem positiven Krater der untersuchten Kohlen wirklich flüssiger reiner Kohlenstoff sei, war das folgende: „Das Erstarrungsprodukt der Schmelze ist dem Aussehen nach Graphit und schreibt wie Bleistift". Wie ich im Vorwort schon dargelegt habe, wurde dieses

Kriterium so lange als nicht beweiskräftig angesehen, solange der Graphit nicht durch eine exakte Analyse als solcher identifiziert worden sei. Ich ließ daher das Erstarrungsprodukt sowohl physikalisch als auch chemisch analysieren, worüber hier berichtet werde.

Das Aussehen der erstarrten positiven Kraterfläche war bei den verschiedenen Kohlensorten ziemlich verschieden. Ich möchte zunächst das Aussehen schildern, welches der geschmolzene Krater einer der Planiakohlen II (0,15 Proz. Aschengehalt), die mir als reinste vor meinem Vortrag zur Verfügung stand, nach der Stromunterbrechung zeigte. Die ganze Kráteroberfläche war vorher flüssig gewesen und in diesem Moment zum Erstarren gebracht worden. Nach vorsichtigem Herausnehmen der positiven Kohle aus der erkalteten Lampe zeigte sich die Kraterfläche zum größten Teile mit feinstem, tiefschwarzem Ruß bedeckt, zum kleineren Teile glänzte die Kraterfläche metallisch. Als ich den Ruß mit dem Finger abwischte, ohne dabei zu reiben oder einen nennenswerten Druck auszuüben, kam eine metallisch glänzende Fläche zum Vorschein, die den ganzen Krater bedeckte und den Eindruck erweckte, als ob derselbe „vernickelt" worden wäre. Diese positive Kohle wurde liebenswürdigerweise von Herrn Prof. Stock, Direktor des anorganischen Instituts der Technischen Hochschule in Breslau, analysiert.

Es werde hier wiederholt, was Moissan am Schluß seiner Untersuchung aller natürlichen und künstlichen Graphite in bezug auf die Definition des Graphits schreibt: „Gemäß der Definition Berthelots geben wir den Namen ›Graphit‹ derjenigen meist kristallinischen Kohlenart, deren Dichte etwa 2,2 ist und welche bei Einwirkung von Kaliumchlorat und (rauchender) Salpetersäure leicht zu charakterisierendes Graphitoxyd liefert".

Die nach dieser Methode von Herrn Prof. Stock ausgeführte Analyse des oben geschilderten metallglänzenden Erstarrungsproduktes ergab das aus dem folgenden Protokoll ersichtliche Resultat.

„Breslau, 8. Dezember 1913.

Nach der üblichen Methode mit Salpetersäure und Kaliumchlorat oxydiert:

Graphit: Gelbgrüne, unlösliche Graphitoxyde.

Kohle: Dunkle, humussäurehaltige Lösungen."

Gemäß diesem Protokoll ist also das Erstarrungsprodukt de: leichtflüssigen Schmelze einer Planiakohle von etwa 0,15 Proz Aschengehalt wirklich Graphit, so wie ihn Berthelot definiert hat. Demnach kann meines Erachtens die Schmelze nur Kohlenstoff in flüssiger Form, aber kein Silikat oder eine andere Kohlenstoffverbindung gewesen sein.

Dieser Befund bestätigt das durch die Analyse auf Aschengehalt gefundene Resultat, daß die Kohlen durch das Glühen in der Bogenlampe ihre Verunreinigungen verlieren, wenigstens am Orte des positiven Kraters.

Um auch zu erfahren, ob das Erstarrungsprodukt der Schmelze das dem Graphit zukommende spezifische Gewicht 2,2 besitzt, wurde dasselbe an mehreren Erstarrungsprodukten bestimmt. Diese Bestimmungen wurden liebenswürdigerweise von Herrn Prof. Beutell, Privatdozent der Mineralogie und Assistent am Mineralogischen Institut der Breslauer Universität, ausgeführt.

Das eine Erstarrungsprodukt war entstanden aus der Erstarrung der Schmelze, welche sich in den Spalten und Rissen einer Planiakohle II angesammelt und daselbst mit den hellen Fischen leichtflüssig gesehen worden war. Nachdem in diesem Moment der Strom unterbrochen, waren die Spalten des positiven Kraters nach dem Erkalten mit dem metallisch stumpfgrau aussehenden Erstarrungsprodukt angefüllt. In diesem Zustand übergab ich die Kohle Herrn Prof. Beutell, welcher mir folgendes Resultat seiner Untersuchung mitteilte:

„6. Dezember 1913.

Spezifische Gewichte von Graphit: 2,157; 2,145; 2,116; von Kohle: 1,800.

Anmerkung: Da der Graphit sehr fest an der Kohle saß, konnten die Flitterchen nicht ganz frei davon erhalten werden.“

Das andere von Herrn Prof. Beutell untersuchte Erstarrungsprodukt der Schmelze an einer käuflichen Kohle war eher vergleichbar mit einer grauglänzenden Metallhaut, die sich relativ leicht von der Kraterfläche abschälen ließ. Das Protokoll dieser Untersuchung lautet:

„Breslau, 30. Dezember 1913.

Mit Thouletscher Lösung[1]) wurden die folgenden spezifischen Gewichte ermittelt:

Kohlenstift	1,778
Die leichtesten Flitter	2,168
Die schwereren Flitter	2,195
Das schwerste Flitterchen	2,630.“

Aus dem großen „Handbuch der Mineralogie“, Bd. I, S. 45 meines Freundes Geheimrat C. Hintze sind die folgenden Angaben über das spezifische Gewicht der verschiedenen natürlichen Graphite entnommen:

Graphit von Ceylon	2,257
„ „ Jenissei	2,275
„ „ Borrowdale	2,286
„ „ Upernivik (Grönland)	2,298
„ „ Arendal	2,321
Hochofengraphit	2,30
Als äußerste Grenzen	2,1—2,3

Man ersieht hieraus, daß auch nach dem spezifischen Gewicht zu urteilen, das Erstarrungsprodukt der Schmelze am positiven Krater der verwendeten reinen und gewöhnlichen Kohlen als Graphit anzusprechen ist.

D. Herstellung der Sonnentemperatur.

(Abhängigkeit der Temperatur des positiven Kraters vom Druck.)

§ 28.

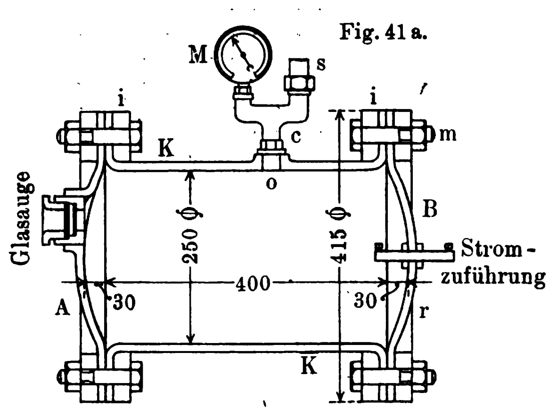
Problemstellung und Ziel.

Nachdem festgestellt war, daß der feste positive Krater der in freier Luft brennenden Bogenlampe seine Normaltemperatur von 4200° abs. auch bei noch so großer Energiezufuhr nicht überschreitet, und nachdem die Bedingungen erkannt waren, unter denen man willkürlich, wenigstens innerhalb des Druckintervalls von $^1/_5$ bis 2 Atm., den Krater als feste oder flüssige Kohle verdampfen lassen kann, lockte eine neue wichtige Aufgabe: Die „Temperaturkurve“ des festen Kraters experimentell zu ermitteln.

[1]) Thouletsche Lösung enthält J_2Hg in JK gelöst.

Zunächst sollte diese Kurve für alle Unterdrucke, von 1 Atm. bis herab zum „Vakuum“, genauer bestimmt werden, auf welchem Gebiet gleich bei den allerersten Versuchen eine Abnahme der Flächenhelligkeit des positiven Kraters sicher nachgewiesen war (§ 18). Mit dem inzwischen gelieferten Druckgefäß für hohe Drucke (Fig. 41, S. 116, 117) sollte alsdann untersucht werden, ob und in welcher Weise die Flächenhelligkeit des Kraters mit wachsendem Druck ansteigt. Falls dieses Ansteigen in analoger Weise und regelmäßig mit dem Druck vor sich gehen sollte, wie das Abfallen bei abnehmendem Druck, so war die Aussicht vorhanden, weit höhere Temperaturen zu verwirklichen als die bisher höchste

Fig. 41 a.



Bis 30 Atm. Druck 10 mm stark

Normaltemperatur von 4200° abs. des positiven Kraters der in freier Luft brennenden Bogenlampe und es winkte das hohe Ziel, die Sonnentemperatur von rund 6000° zu erreichen.

Wieweit diese Ziele bisher erreicht worden sind, darüber soll in diesem Teile berichtet werden.

§ 29.

Versuchsanordnung und Apparatur.

Die Messungen der Flächenhelligkeit des positiven Kraters bei verschiedenen Unterdrucken sind zuerst an der Bogenlampe im eisernen Gefäß (Fig. 22, S. 70) angestellt worden, wobei die Versuchsanordnung die in Fig. 2, S. 27 skizzierte und daselbst beschriebene war. Später wurde auch bei diesen Messungen das inzwischen

beschaffte Gefäß für Überdrucke bis 30 Atm. benutzt. Da dabei auch die inzwischen eingeführte neue Beobachtungsmethode Verwendung fand, so wollen wir sowohl diese als auch das Druckgefäß schon hier beschreiben. Das Druckgefäß ist in Fig. 41 a im Querschnitt und in Fig. 41 b perspektivisch dargestellt.

a) Druckgefäß. Das aus Kupfer getriebene Gefäß ist von der Firma C. Heckmann in Breslau gefertigt und bis auf Drucke

Fig. 41 b.



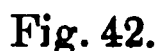
von 30 Atm. geeicht. Es besteht im wesentlichen aus dem Kupferzylinder K von 50 cm Länge, 25 cm Durchmesser und 1 cm Wandstärke und den beiden etwas gewölbten Verschlußplatten oder Stirnwänden A und B. Der Inhalt beträgt etwa 30 Liter. Die hintere Verschlußplatte B („Boden“) bleibt fest mit dem Zylinder K verschraubt, die vordere Verschlußplatte A („Deckel“) ist nach Lösen von zwölf Schraubenmuttern m abnehmbar.

Der Deckel A ist etwas oberhalb seiner Mitte zu einem Rohrstutzen ausgetrieben, in welchem luftdicht eine 15 mm dicke Spiegelglasplatte befestigt ist, deren Befestigungsweise aus der in Fig. 41 a abgebildeten Arbeitsskizze hervorgeht. Im Boden B ist das

Rohr *r* luftdicht eingefügt, durch welches die Zuleitungsdrähte zur Bogenlampe und zum Regulierwiderstand (§ 18) eingeführt werden.

Mittels des Regulierwiderstandes konnte also auch die im Überdruckgefäß eingeschlossene Bogenlampe in bezug auf die Länge des Flammenbogens von außen willkürlich eingestellt werden.

Der obere Teil des Zylinders besitzt ebenfalls eine Bohrung *o*, welche zum T-förmigen Ansatzstutzen *c* führt, der einerseits zum Manometer *M* für hohe Drucke bzw. zum passend angeschlossenen


Fig. 42.



Hg-Manometer bei Unterdrucken, andererseits zum Anschlußstück *s* für die Herstellung des Überdruckes bzw. der Luftverdünnung führt. Bei Benutzung von Luft wurde *s* direkt mit der Druckluftleitung der im Breslauer Physikalischen Institut vorhandenen Anlage verbunden, welche Drucke von 200 Atm. zu liefern vermag. Bei Benutzung von anderen Gasen wurden an *s* direkt die das Gas liefernden, unter hohem Druck stehenden „Bomben“ angeschlossen. Beim Arbeiten im Unterdruck wurde *s* mit der in Fig. 41 b neben dem Druckgefäß stehenden Gaedeschen Kapsel-Luftpumpe *G* verbunden.

Die luftdichte und drucksichere Verbindung zwischen dem Kupferzylinder *K* und dem Deckel bzw. Boden war folgendermaßen bewirkt: Es waren die Innenseiten der beiden Verschlußplatten, da, wo sie auf den Flanschen *i* des Zylinders liegen, ebenso wie diese eben abgedreht worden. Als Zwischenlage dienten mit passenden Ausschnitten für die Befestigungsbolzen versehene 3 mm dicke flache Ringe aus „Klingerit".

Auf dem Boden des Zylinders *K* war im Inneren ein aus Metall gearbeiteter Untersatz montiert, auf welchem die Bogenlampe (Fig. 21, S. 68) stets ihre geeignete Lage wieder einnahm.

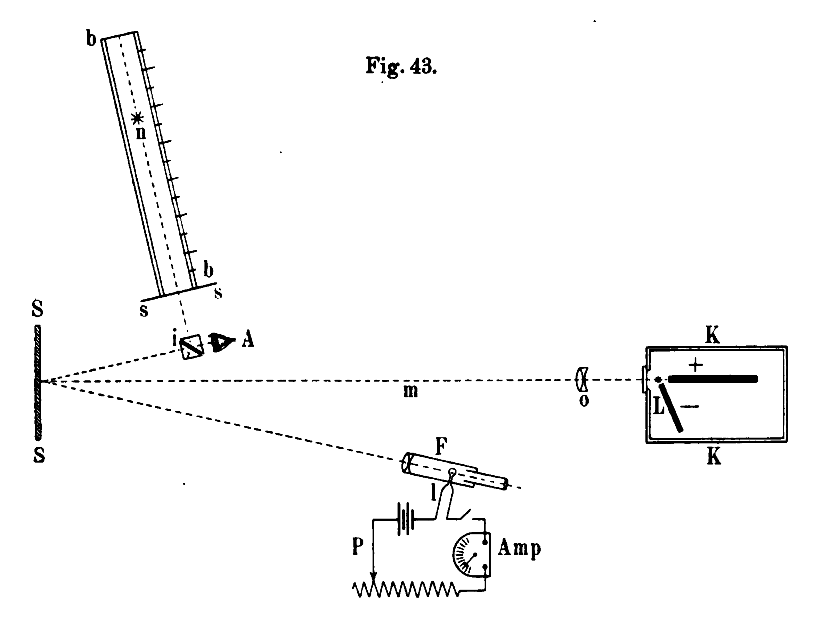


Fig. 43.

Das Ganze war auf einem soliden Holzbock montiert und mit diesem durch Metallbänder fest verbunden, so daß selbst beim Festziehen der Muttern zur Befestigung des Deckels der Zylinder sich weder drehte, noch das Ganze sich auf dem Tische bewegte. Das Gewicht des fertig montierten Gefäßes beträgt etwa 180 kg.

b) Versuchsanordnung. Die neue Versuchsanordnung bei Benutzung des Druckgefäßes ist aus Fig. 42 und aus der Skizze (Fig. 43) zu ersehen. Darin bedeutet *S* den Gipsschirm; *K* das Druckgefäß; *m* den in Fig. 43 nicht gezeichneten Motor, mit Hilfe

dessen am Orte des Interferenzphotometers *i* das den Krater abbildende Objektiv *o* (nur in Fig. 44 vorhanden) dem Krater genähert bzw. von ihm entfernt werden konnte; *n* die auf einer kleinen optischen Bank *bb* meßbar verschiebbare Vergleichslichtquelle (Nernstlampe bzw. $^1/_2$-Wattlampe).

Während bei der früheren in Fig. 2, S. 27 skizzierten Versuchsanordnung das Licht der Bogenlampe *L* durch die Reflexion an vier Glasflächen geschwächt werden mußte, ist das bei der neuen Versuchsanordnung nicht nötig. Durch die etwa 30fache Vergrößerung der Kraterfläche und durch das Entwerfen des Bildes auf dem ebenen, diffus reflektierenden Gipsschirm wird die Helligkeit genügend geschwächt, um mit Hilfe der oben genannten Vergleichslichtquelle die Interferenzstreifen im Photometerwürfel *i* zum Verschwinden zu bringen.

Photometrische Messungsmethode. Während früher das Verschwinden der Interferenzstreifen im Fernrohr beobachtet wurde, habe ich bei der jetzigen Versuchsanordnung aus verschiedenen Gründen das Fernrohr fortgelassen und mit dem bloßen Auge *A* beobachtet. Diese Anordnung macht das Interferenzphotometer gerade für die vorliegende Aufgabe ganz besonders geeignet, welche darauf hinausläuft, die Helligkeit der Fische mit derjenigen des festen sublimierenden Kraters oder der Waben auf dem Grunde des flüssigen Teiches zu vergleichen.

Blickt man direkt durch den Interferenzwürfel *i* auf den gleichmäßig beleuchteten Gipsschirm *SS*, so sieht man auf ihm die Interferenzstreifen des durchgehenden Lichtes liegen. Je dünner die Luftplatte des Würfels ist, um so größer ist der Abstand der Streifen voneinander und um so deutlicher erscheinen diese in fast jeder Entfernung. Diese mit bloßem Auge betrachteten Streifen bedecken scheinbar die ganze Gipsfläche.

Ganz besonders eignet sich mein ziemlich weitsichtiges Auge zur Beobachtung, da für dasselbe der Gipsschirm in etwa 60 cm Entfernung stehen muß, um das Kraterbild auf ihm deutlich zu sehen und da die Interferenzstreifen in solcher Entfernung ebenfalls fast absolut scharf erscheinen. Da sich von allen Streifen der „achromatische" Streifen (§ 7) durch besondere Schärfe auszeichnet, so wurde bei der Messung vor allem auf sein Verschwinden eingestellt.

Um dieses Streifensystem im durchgehenden Lichte zum Verschwinden zu bringen, wurde das Streifensystem zugleich im reflektierten Lichte, und zwar von der Mattscheibe *ss* erzeugt, die ihr Licht von der Vergleichslichtquelle *n* erhielt. Damit das Korn der Mattscheibe nicht sichtbar war, wurde diese nahe an der zugehörigen Würfelfläche montiert.

Um einen beliebigen Teil des auf dem Gipsschirm vergrößerten Kraterbildes (Durchmesser des vollen Kraters einer 10 mm dicken Kohle etwa 30 cm) photometrisch abtasten zu können, war der Interferenzwürfel auf seinem Tischchen drehbar um die vertikale Achse montiert. Beim Einstellen auf das Verschwinden der Streifen änderte man die Entfernung der Vergleichslichtquelle und drehte gleichzeitig den Würfel; man konnte so das Kraterbild in horizontaler Richtung an einer beliebigen Stelle photometrieren. Die Helligkeitsverteilung in vertikaler Richtung dokumentiert sich von selbst, insofern die Streifen das ganze Kraterbild von oben nach unten durchziehen. Das seitliche Abtasten ist notwendig, da man genau nur durch das Verschwinden des achromatischen Streifens photometrieren kann.

Es seien noch einige Worte darüber gesagt, was man beim flüssigen Krater eigentlich photometriert. Sind im flüssigen Kohlenteich sehr viele Fische vorhanden, so kann man sie mit bloßem Auge kaum voneinander trennen und der achromatische Streifen verschwindet auf seiner ganzen Länge. In diesem Falle photometriert man die Flächenhelligkeit der Fische. Sind nur relativ wenige und entsprechend große Fische vorhanden, wie es bei relativ geringem Druck der Fall ist (§ 21), so ist der achromatische Streifen nicht auf seiner ganzen Länge gleichzeitig zum Verschwinden zu bringen, da die hellen Fische durch die dunklere Flüssigkeit getrennt sind. Hier kann man beinahe jeden einzelnen Fisch photometrieren und gleichzeitig den durch die Flüssigkeit hindurchleuchtenden Grund des Teiches.

Ich glaube nach meinen Erfahrungen behaupten zu dürfen, daß zur Ausführung solch diffiziler Messungen das optische Pyrometer in irgend einer der vorhandenen Ausführungsformen nicht geeignet ist. Gleichwohl habe ich mich eines von uns gefertigten und mit dem schwarzen Körper geeichten Pyrometers nach Holborn-Kurlbaum[1])

[1]) L. Holborn und F. Kurlbaum, „Über ein optisches Pyrometer". Ann. d. Phys. **10**, 225—241 (1903).

(P in Fig. 43) bedient, erstens um diese Erfahrungen zu sammeln und zweitens um die Flächenhelligkeit bei großen, gleichmäßig leuchtenden, festen Kratern zu messen, wenn auch nur zur Kontrolle. Um bequem jede Stelle des Kraterbildes photometrieren zu können, war das Pyrometerfernrohr F in einem Kugelgelenk drehbar montiert. Die Stromstärke der kleinen Vergleichsglühlampe l im Fernrohr wurde wie üblich reguliert und am Milliamperemeter (*Amp*) abgelesen. Die Genauigkeit der Einstellung betrug bei diesen Messungen etwa 1 Milliampere.

§ 30.

Temperaturkurve des Kohlenstoffs bei Unterdrucken ($<$ 1 Atm.).

Als Ausgangspunkt werde der Atmosphärendruck gewählt, bzw. die Flächenhelligkeit des positiven festen Kraters der in freier Luft brennenden Bogenlampe. Zu ermitteln ist, wie sich diese mit abnehmendem Druck ändert, wenn man dafür sorgt, daß dabei der positive Krater stets in festem Zustande verdampft. Aus diesen photometrischen, relativen Messungen müssen wir dann erst auf die Änderung der Temperatur mit abnehmendem Druck schließen.

Über die allerersten Versuche an der Bogenlampe unter der Luftpumpenglocke ist kurz schon im § 18 berichtet worden. Auch wurde daselbst das eiserne Gefäß beschrieben (Fig. 22, S. 70), mit welchem dann die weiteren Versuche sowohl über das Schmelzen der Kohle wie über die Helligkeitsabnahme des positiven Kraters mit abnehmendem Druck angestellt worden sind und über welche zunächst referiert werden soll, da sie einen Einblick in die Wandlung meiner Anschauungen über die etwas verwickelten Erscheinungen gestatten.

Bei der damals benutzten Methode, das photometrische Phänomen im Fernrohr zu beobachten (Fig. 2, S. 27), stellte ich die diesbezüglichen Messungen in folgender Weise an. Nachdem beim Atmosphärendruck durch Verschieben der Vergleichslichtquelle (L_2) die Streifen auf dem positiven Krater zum Verschwinden gebracht waren, wurde die Stellung der Vergleichslichtquelle notiert. Dann wurde der Druck im Gefäß um einen gewissen Betrag ver-

mindert und wieder die Stellung der Vergleichslichtquelle notiert, bei welcher jetzt die Streifen zum Verschwinden gebracht worden waren usw. Stets suchte man die Streifen auf der hellsten Stelle des Kraters zum Verschwinden zu bringen.

Dabei stellte es sich heraus, daß die Flächenhelligkeit nicht regelmäßig mit der Verringerung des Druckes abnahm. Vielmehr trat bei einem Druck von ungefähr $^1/_2$ Atm. eine Unstetigkeit ein, insofern hier die Flächenhelligkeit des Kraters etwa die gleiche war wie diejenige beim Normaldruck von 1 Atm. Erst bei relativ kleinen Drucken nahm die Helligkeit wieder mit abnehmendem Druck ab. Die Erklärung für dieses merkwürdige Verhalten wurde erst durch die später gemachte Beobachtung des flüssigen Zustandes des Kraters erbracht.

Nachdem der flüssige Zustand beobachtet worden war, wurde daher bei Wiederholung dieser Versuche das Fernrohr genauer auf die Kraterfläche eingestellt, um gleichzeitig mit den Streifen auch alle Einzelheiten der Kraterfläche, vor allem aber den zäh- oder leichtflüssigen Zustand der Kraterfläche deutlich zu erkennen. Dabei bestätigte sich die gehegte Vermutung, daß die oben erwähnte unregelmäßige Abnahme der Flächenhelligkeit mit abnehmendem Druck durch den flüssigen Zustand der Kohle bedingt sein müßte. Von jetzt ab wurde daher beim Photometrieren stets auch der „Zustand“ des Kraters beobachtet und protokolliert, ob der positive Krater fest, flüssig oder zähflüssig usw. war. Freilich war das noch zu einer Zeit, bei der der leichtflüssige Zustand sich nur bei etwa $^1/_2$ Atm. Druck einstellte und im Fernrohr als „Brodeln“ und „Sieden“ sich darstellte (§ 18). Damals war bei Unterdrucken zwischen $^1/_2$ und 1 Atm. nur ein „zähes Fließen“ oder „Schlierenbildung“ auf der Kraterfläche zu bemerken, während bei Drucken kleiner als $^1/_2$ Atm. die Kraterfläche große „Blasen“ zu werfen schien.

In der folgenden Tabelle ist eine solche Beobachtungsreihe vom 8. August 1913 aus dem Protokoll ausgezogen mit den Bemerkungen, die sich in diesem vorfinden und die bei neueren Beobachtungen nicht wiederkehren, da es sich inzwischen herausgestellt hatte, daß von „Blasenwerfen“ und „Brodeln“ keine Rede sein kann (vgl. § 19). In der Tabelle gibt die erste Vertikalreihe die Drucke im Gefäß in cm Hg und umgerechnet in Atmosphären an; die zweite enthält die Entfernung der Nernstlampe von der

Mattscheibe; die dritte Reihe enthält die aus diesen Einstellungen berechnete Helligkeit, bezogen auf diejenige bei 75 cm Hg (Atmosphärendruck) gleich „Eins".

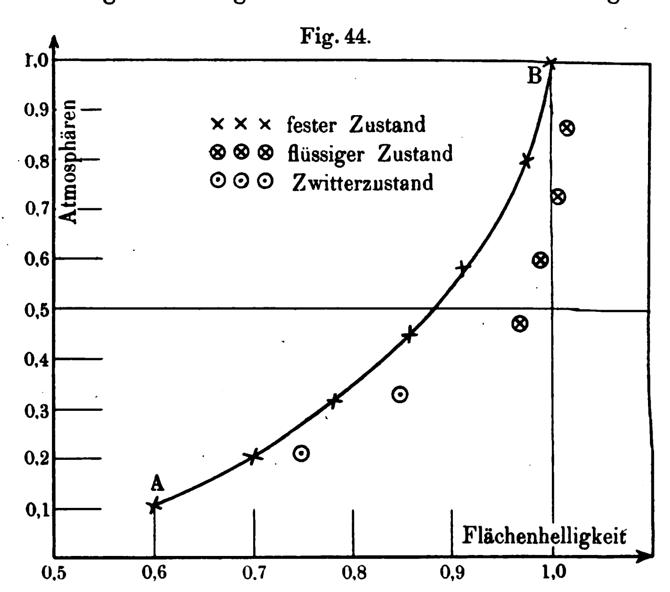
Tabelle IX.

Druck in cm Hg	Druck in Atm.	Einstellung in cm	Flächen-helligkeit	Bemerkungen im Protokoll
75	1,00	80,0	1,00	Krater fest, weil nichts im Protokoll über Blasen, Schmelzen usw. gesagt ist.
60	0,80	81,3	0,96	
44	0,59	84,5	0,88	
34	0,45	87,1	0,83	
24	0,32	91,5	0,75	
15	0,20	96,9	0,68	
8	0,11	103,7	0,59	Negativer Krater gleich hell.
16	0,21	93,1	0,73	Große Blasen.
25	0,33	87,6	0,83	
35	0,47	81,9	0,94	Pos. Kr. brodelt und perlt.
45	0,60	80,9	0,96	Pos. Kr. kocht.
55	0,73	80,3	0,99	Krater kocht in Schlieren.
65	0,87	80,0	1,00	Schlieren.

Wären die Bemerkungen über den Zustand des Kraters nicht vorhanden, und würden wir alle Beobachtungen als gleichberechtigt in graphischer Darstellung registrieren, indem wir wie in Fig 44 als Ordinaten die Drucke (in Atmosphären) und als Abszissen die zugehörigen Flächenhelligkeiten eintragen, so würden wir bei Verbindung sämtlicher Beobachtungspunkte eine Zickzackkurve erhalten. Trennen wir aber diejenigen Beobachtungen, bei denen im Protokoll über den Zustand des Kraters nichts steht, d. h. der Krater fest gewesen ist, von denen, wo der Krater „Schlieren" zeigte oder „Perlen" oder „Blasen", wie es in Fig. 44 wirklich geschehen ist, so erhalten wir ein ganz anderes Resultat: Die Flächenhelligkeiten des festen Kraters liegen auf einer glatten Kurve, wie sie glatter und regelmäßiger weder gewünscht noch erwartet werden kann. Die Flächenhelligkeiten des Kraters in leichtflüssigem („perlenden") Zustand liegen nahe auf einer zur Ordinatenachse parallelen Geraden, während die Flächenhelligkeiten des „Blasen" werfenden Kraters zwischen beiden Kurven gelegen sind, wie es vielleicht ihrem „Zwitterzustand" zukommen dürfte.

Also schon damals hätte man bei dieser „Deutung“ der Versuchsergebnisse das Resultat aussprechen können, welches durch neuere Versuche bestätigt worden ist, daß im Druckintervall von etwa $^1/_5$ bis 1 Atm. die Flächenhelligkeit des im festen Zustande verdampfenden Kraters stets kleiner ist als diejenige des im „leicht- oder zähflüssigen“ Zustande befindlichen Kraters. In Wirklichkeit ist diese „Deutung“ bzw. Trennung des flüssigen und festen Kraters erst vorgenommen

Fig. 44.



worden, als man imstande war, nach Willkür den leichtflüssigen Zustand bei fast jedem Unterdruck bis zu $^1/_5$ Atm. herab zu verwirklichen (§ 21).

Um bei jedem Unterdruck aus der beobachteten Flächenhelligkeit die entsprechende Temperatur zu ermitteln, verwenden wir die im § 14 mitgeteilte Beziehung zwischen der Flächenhelligkeit und der Temperatur der Kohle. Dabei machen wir zwei Annahmen. Erstens, daß jene für die Glühlampenkohle experimentell gefundene Beziehung auch für die Bogenlampenkohle gilt. Diese Annahme dürfte richtig sein, da auch bei festem leuchtenden Krater infolge des Selbstreinigungsprozesses (§ 26) reiner Kohlenstoff wie bei den Kohlenfäden der Glühlampe leuchtet. Zweitens extra-

polieren wir die nur bis etwa 3000° abs. erwiesene Beziehung zu sehr viel höheren Temperaturen.

Gemäß der Kurve in Fig. 13, welche lehrt, daß die Potenz x sich mit steigender Temperatur asymptotisch dem Werte $x = 8{,}5$ nähert, nehmen wir an, daß dieser Wert auch noch bei den hier in Frage kommenden Temperaturen bis 6000° abs. richtig sei.

Ich glaube kaum, daß wir durch diese Extrapolation über das beobachtete Temperaturintervall hinaus einen großen Fehler begehen. Vielleicht wird man sagen, daß jene Kurve für die Potenz x an der asymptotischen Stelle (zwischen 2700 und 3000° abs.) einen „Wendepunkt" besitzt und bei höheren Temperaturen nach abwärts laufen könnte, so daß bei diesen $x < 8{,}5$ würde. Wäre dem wirklich so, dann erhielten wir aus den beobachteten Flächenhelligkeiten nur noch höhere Temperaturen, als wir sie bei Verwendung von $x = 8{,}5$ erhalten.

In der folgenden Tabelle sind die mit $x = 8{,}5$ von $^1/_{10}$ zu $^1/_{10}$ Atm. die zur Flächenhelligkeit der Kurve AB (Fig. 44) be-

Tabelle X.

Atmosphären	Helligkeit	Temperatur abs.
1,0	1,0	4200
0,9	0,99	4195
0,8	$0{,}97_5$	4185
0,7	$0{,}95_5$	4175
0,6	$0{,}92_5$	4160
0,5	$0{,}88_5$	4145
0,4	$0{,}83_5$	4110
0,3	0,72	4070
0,2	0,70	4025
0,1	0,59	3940

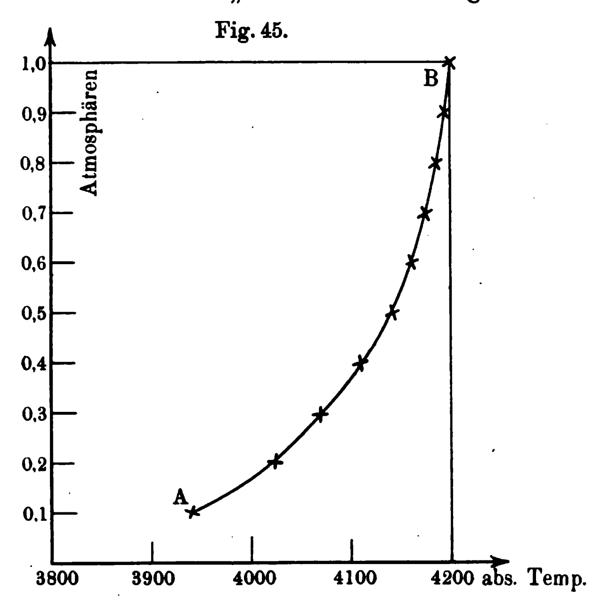
rechneten absoluten Temperaturen mitgeteilt. Die so erhaltenen zueinander gehörigen Wertepaare sind in Fig. 45 zu einer Kurve vereinigt worden. Diese möchte ich als „Temperaturkurve" des Kohlenstoffs für Unterdrucke (zwischen $^1/_{10}$ und 1 Atm.) bezeichnen.

Neuere diesbezügliche Versuche sind mit dem in Fig. 43 skizzierten und in Fig. 42 photographisch reproduzierten Aufbau angestellt worden. Diese haben ähnlich verlaufende Temperaturkurven ergeben und außerdem gezeigt, daß die Helligkeit der

Fische im leichtflüssigen Kohlenteiche bei allen Drucken, bei denen der positive Krater flüssig zu beobachten war (§ 21), immer nahe die gleiche ist, ganz gleichgültig, welche Kohlensorte zum Schmelzen gebracht wird. Während die Flächenhelligkeit der Fische aber beim Unterdruck größer als diejenige des festen, sublimierenden Kraters ist, ist sie bei Überdrucken und zwar vom Atmosphärendruck an kleiner.

Die neueren Versuche sollten auch die Frage entscheiden, ob jeder Kohlensorte eine „individuelle" Helligkeitskurve, also

Fig. 45.



auch eine individuelle Temperaturkurve zukomme. Diese noch vorläufigen Versuche machen es wahrscheinlich, daß den verschiedenen Kohlensorten tatsächlich verschiedene Helligkeitskurven, also auch verschiedene Temperaturkurven zukommen.

§ 31.

Temperaturkurve des Kohlenstoffs bei Überdrucken.

Auch hier wollen wir wieder die Flächenhelligkeit gleich Eins setzen, welche der in festem Zustand verdampfende positive Krater der in freier Luft brennenden Bogenlampe besitzt und ermitteln, wie dessen Flächenhelligkeit und Temperatur mit

wachsendem Druck steigt. Oberhalb eines Druckes von etwa 2 Atm. verdampft der positive Krater in festem Zustand bei jeder Strombelastung, wenigstens konnte ich bisher, wie erwähnt, bei Drucken über 2 Atm. keinen flüssigen Zustand beobachten. Unterhalb dieses Druckes bis herab zu etwa $^1/_5$ Atm. kann man nach Willkür bald den festen, bald den flüssigen Krater erzeugen.

Ehe wir die Versuchsergebnisse bei Überdrucken mitteilen, mögen einige Bemerkungen über die Erfahrungen gestattet sein, welche es bisher verhindert haben, einigermaßen endgültige Resultate zu gewinnen.

a) Technische Schwierigkeit bei der Bildung eines „wirklichen" Lichtbogens. Die Hauptschwierigkeit bei diesen Druckversuchen ist technischer Natur, nämlich die Erzeugung eines „wirklichen" oder „wahren" Lichtbogens bei hohen Drucken. Was ich unter wirklichem Lichtbogen verstanden wissen möchte, ist nicht mit einem Worte zu sagen.

Damit der Flammenbogen seine größte Heizwirkung am positiven Krater hervorbringt, muß meines Erachtens die ganze lebendige Kraft („Stoßkraft") der vom negativen Krater mit großer Geschwindigkeit herkommenden Elektronen auch voll zur Wirkung kommen. Wird die Stoßkraft der Elektronen durch irgend welche Hindernisse verkleinert, dann übt der Bogen nicht mehr seine maximale Heizwirkung aus, dann ist er kein „normaler", kein „wirklicher" Bogen mehr.

Dies kann ich am einfachsten an der folgenden bei Schmelzversuchen im Unterdruck stets beobachteten Tatsache erläutern. Hat man z. B. bei $^1/_2$ Atm. Druck das leichtflüssige Schmelzphänomen hergestellt, so kann man dasselbe auf dem Gipsschirm eine lange Zeit hindurch beobachten, kaum daß man nötig hat, an der einmal hergestellten richtigen Strombelastung etwas zu regulieren. Es werde zunächst Luft als umgebendes Medium und die Verwendung ungetränkter Kohlen vorausgesetzt. Verfolgt man gleichzeitig das Schmelzphänomen und das Leuchten des Flammenbogens vom Beginn des Versuches an, so beobachtet man stets, daß das anfangs schwache Bogenleuchten mit der Zeit immer mehr und mehr zunimmt. Dabei hat in Luft das Licht des Bogens eine ausgeprägt blaue Färbung wohl infolge des Leuchtens von Kohlenoxyd. Sobald dieses blaue Bogenleuchten sein Maximum erreicht hat, setzt das Schmelz-

phänomen aus und ist auch durch Stromregulierung nicht wieder herzustellen, gleichviel ob man die Stromstärke verkleinert oder vergrößert, ob man den Bogen lang oder kurz macht. Dieses Verhalten tritt in Luft meist nach etwa 30 Minuten ein. Es tritt aber das Aussetzen des Schmelzphänomens nach längerem Verweilen bei gleichzeitigem Anwachsen des Bogenleuchtens ebenso in Sauerstoff, Stickstoff und Kohlensäure ein [1]).

Sobald man das Gefäß wieder mit frischer Luft (bzw. Gas) füllt, den gleichen Unterdruck von etwa $^1/_2$ Atm. und die beim ersten Versuch angewandte Stromstärke herstellt, tritt sofort auch das leichtflüssige Schmelzphänomen von neuem auf, um unter den gleichen geschilderten Begleitumständen wieder nach etwa einer $^1/_2$ Stunde völlig auszusetzen. Dies wiederholt sich, bis nach und nach der ganze Kohlenstab geschmolzen und durch den flüssigen Zustand hindurch in Dampf verwandelt ist.

Ich erwähne diese Beobachtungen beim Arbeiten mit Unterdruck erst hier, da sie einen Hinweis geben können, warum man unter Anwendung hoher Drucke bei Verwendung gebräuchlicher Kohlen keinen „wahren“ oder „wirklichen“ Bogen erhält.

Wir erfuhren oben, daß das Schmelzphänomen aussetzt, wenn das Leuchten des Flammenbogens sein Maximum erreicht hat. Außerdem wissen wir, daß bei einem Druck von etwa $^1/_2$ Atm. die Flächenhelligkeit des flüssigen Kraters (genauer die der „Fische“) größer ist als diejenige des festen Kraters. In anderen Worten heißt das, der Bogen muß den positiven Krater auf eine höhere Temperatur erhitzen, wenn er ihn zum Schmelzen, als wenn er ihn nur zum Verdampfen bringen soll. Übrigens gilt dies auch noch für den Normaldruck.

Aus der Theorie der Elektrolumineszenz, speziell des Leuchtens der Gase in Röhren bei vermindertem Druck („Geißlerröhren“)

---

[1]) Etwas Ähnliches hat man schon bei den unter Luftabschluß oder in Wasserstoff brennenden Bogenlampen beobachtet. Es genüge anzuführen, was Simon in seinem Artikel „Lichtbogenentladung“ (Handwörterbuch der Naturwissenschaften 6, 204, 1912) schreibt: „Brennt der Kohlenlichtbogen in Wasserstoff oder in seinen eigenen Verbrennungsgasen, so beobachtet man bei genügend kleiner Stromstärke eine Lichtbogenentladung, bei der wohl ein negativer, aber kein positiver Krater ausgebildet ist. In diesem Falle reicht die Verdampfung am negativen Krater nicht aus, den ganzen Bogen mit Elektrodengas zu erfüllen und die Lichtbogenentladung vollzieht sich zum Teil in dem einhüllenden Gase.“

ist bekannt, daß der Elektronenstoß die Gasmoleküle zum Leuchten bringt und daß dieses auf Kosten der lebendigen Kraft der bombardierenden Elektronen geschieht. Womit das geschilderte, immer stärker werdende blaue Leuchten des Bogens in Luft bei einem Druck von etwa $^1/_2$ Atm. auch immer zusammenhängen mag, jedenfalls muß es eine Schwächung der Stoßkraft der Elektronen zur Folge haben. Daraus resultiert dann die Abnahme der Heizwirkung des Bogens und das Aufhören des Schmelzphänomens: Der Flammenbogen ist gemäß meiner Definition jetzt kein „wirklicher“, kein „wahrer“, kein „normaler“ Bogen mehr, wie er es war, bevor das Gasleuchten auf seine maximale Höhe gelangte.

Freilich möchte ich nach den wenigen bisherigen Versuchen bei hohem Druck durchaus nicht behaupten, daß auch hier die wirksame Bogenbildung durch die gleiche Ursache verhindert wird, welche bei den Versuchen im Unterdruck nach längerem Brennen der Lampe den Flammenbogen unwirksam werden läßt. Tatsache ist, daß sich bei hohen Drucken entweder gar kein stationärer Lichtbogen ausbildet oder kein normaler, kein „wirklicher“ Bogen. Demgemäß kann man von vornherein nichts Bestimmtes über die Größe des Kraters, seine Flächenhelligkeit und Temperatur aussagen.

Um zum Ziele zu kommen und feststellen zu können, ob die Flächenhelligkeit mit dem Druck ansteigt, habe ich anfangs nicht bei stationär brennendem Flammenbogen beobachtet, sondern die Stromstärke so eingestellt, daß die Reguliervorrichtung sehr schnell arbeitete und die Kohlen in kurzen Intervallen aufeinander geschlagen und wieder auseinandergezogen wurden. Auf solche Weise sind die im folgenden mitgeteilten älteren Versuchsergebnisse erzielt worden.

b) Ältere Versuchsergebnisse. Diese sind gleich nach Fertigstellung des kupfernen Druckgefäßes angestellt worden, zu einer Zeit (Anfang August 1913), zu der ich den flüssigen Zustand weder beim Atmosphärendruck noch viel weniger bei höherem Druck beobachtet hatte. Bei diesen Versuchen ist jedenfalls der feste Krater photometriert worden. Dies geht auch schon daraus hervor, daß damals so große Stromstärken verwandt wurden, daß sie nach den heutigen Erfahrungen gar nicht imstande waren, den positiven Krater zum Schmelzen zu bringen.

In der folgenden Kurve (Fig. 46) sind einige Resultate der damaligen Beobachtungen wiedergegeben, welche noch mit dem in Fig. 2, S. 27 skizzierten Aufbau, also unter Anwendung eines Beobachtungsfernrohres ausgeführt worden sind.

Auch hier ist, wie bei den Versuchen im Unterdruck, die Flächenhelligkeit des positiven Kraters beim Normalruck von 1 Atm. gleich „Eins" gesetzt.

Die aus den photometrischen Einstellungen berechneten relativen Helligkeiten für die höheren Drucke sind in Fig. 46 eingetragen worden, in welcher wiederum als Ordinaten die Drucke in Atmosphären und als Abszissen die zugehörigen Flächenhelligkeiten gewählt sind.

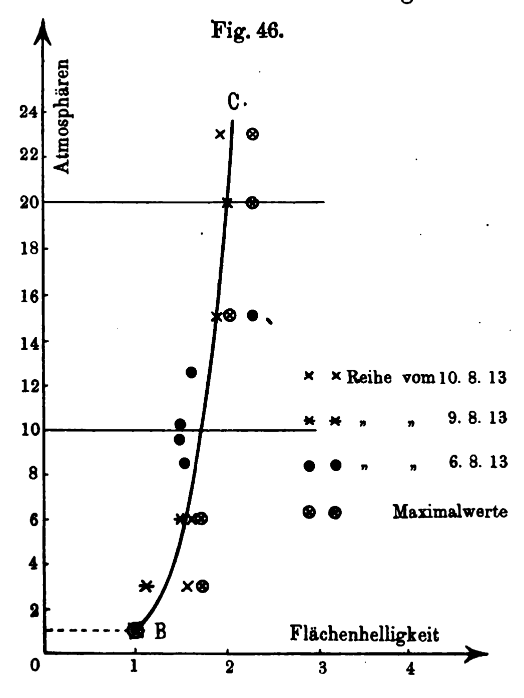


Fig. 46.

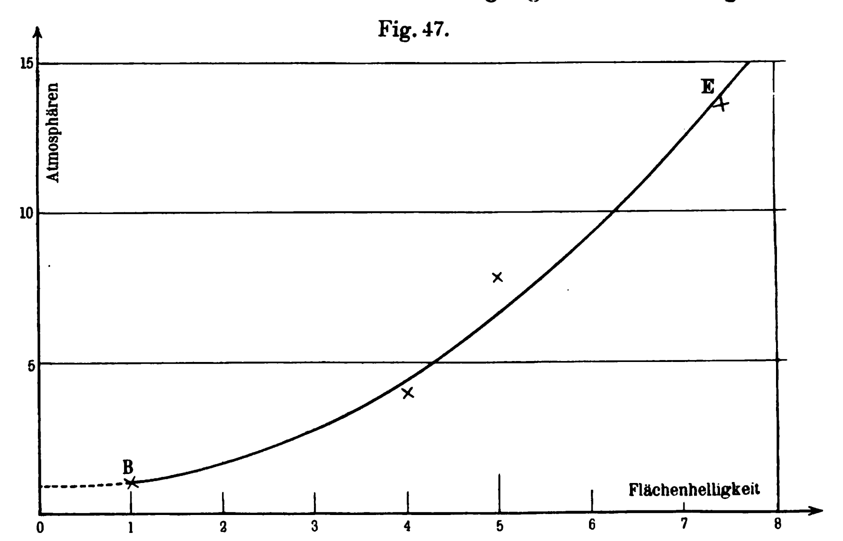
Wenn es erlaubt sein sollte, eine Kurve durch die beobachteten Punkte zu legen, so dürfte die von mir in Fig. 46 gezogene Kurve *BC* den einzelnen Beobachtungen noch am gerechtesten werden. Bei aller Ungenauigkeit dieser Kurve durfte sie wenigstens insoweit verwendet werden, daß man folgendes Resultat als Tatsache hinstellen kann: Es steigt die Flächenhelligkeit des positiven festen Kraters mit steigendem Druck.

Später erhielt ich auf dieselbe Weise aber unter Verwendung geeigneterer Kohlen eine Versuchsreihe, welche ein sehr viel schnelleres Ansteigen der Flächenhelligkeit des positiven Kraters mit dem Druck ergab. Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe sind in Fig. 47 wieder wie oben eingetragen. Selbst wenn man die

Maximalwerte aus Fig. 46 in Fig. 47 eintragen würde, liegen sie noch immer links von der Kurve *BE* der Fig. 47.

c) Neuere Versuchsreihen. Sehr viel später erst ist es mir auf Grund systematisch angestellter Versuche und der hierbei gewonnenen Erkenntnisse gelungen, auch einen „stationären“ Flammenbogen bei Überdrucken zu erzielen. Anfangs freilich nur bei relativ kleinen Überdrucken und schließlich auch bei höheren Drucken. Über die Bedingungen zur Erzielung eines

Fig. 47.

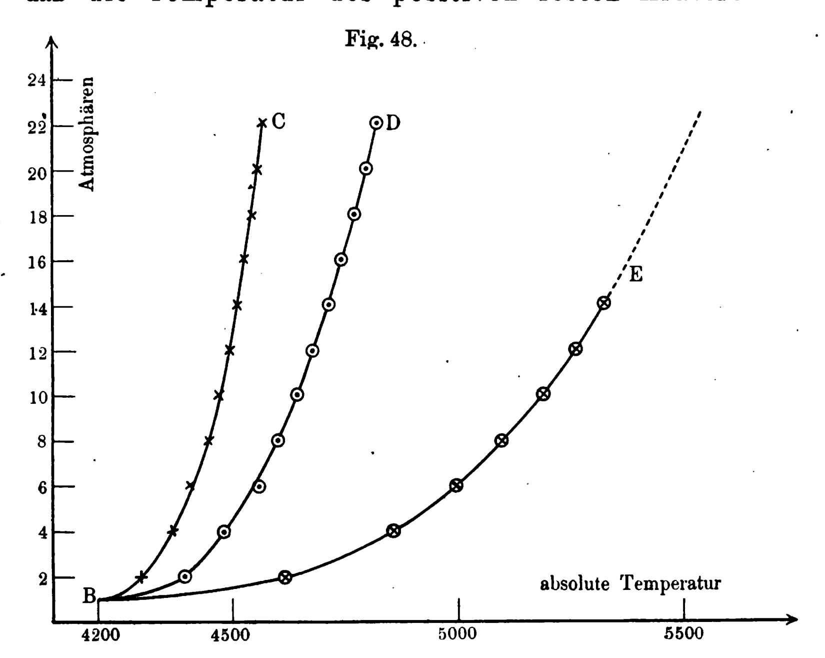


stationären Lichtbogens bei hohen Drucken und eines möglichst hochtemperierten, positiven Kraters wird an anderer Stelle ausführlich berichtet werden.

Die Ergebnisse einiger Versuchsreihen vom März d. J., bei denen zum ersten Male ein stationärer, wenn auch noch lange kein „wahrer“ Lichtbogen erhalten wurde, sind als Helligkeitskurve nicht mitgeteilt worden, da sie inzwischen durch die neuerdings erhaltenen Ergebnisse bei wirklich stationären Flammenbogen überholt worden sind. Wohl aber sind die Ergebnisse dieser Versuche in Fig. 48 als Temperaturkurve *BD* mitgeteilt. Diese Figur enthält zugleich die Temperaturkurven *BC* und *BE*, welche aus den Helligkeitskurven *BC* in Fig. 46 und *BE* in Fig. 47 berechnet worden sind. Diese Berechnung geschah nach dem im § 30 geschilderten Verfahren.

Die Nebeneinanderstellung der verschiedenen bis zum März d. J. erhaltenen Temperaturkurven zeigen so recht den provisorischen Charakter der Versuche bei hohen Drucken. Diese weit voneinander abweichenden Kurven lassen gleichwohl sicher erkennen, daß die Temperatur des positiven festen Kraters mit

Fig. 48.



steigendem Druck kontinuierlich steigt und daß die Temperaturkurve asymptotisch verläuft.

Dieses Resultat wird bestätigt durch die neuesten Versuche, die mit besonders von den Planiawerken angefertigten und mit ganz bestimmten, durch systematische Versuche ermittelten, Salzen getränkten Kohlen angestellt wurden. Die Ergebnisse zweier Versuchsreihen (Mai d. J.) sind in Tabelle XI niedergelegt. Bei der ersten Versuchsreihe wurde bei 8,5 mm dicker Kohle eine Stromstärke von im Mittel 26 Amp. benutzt, bei der zweiten Versuchsreihe dagegen eine mittlere Stromstärke von 40 Amp. Eine systematische Untersuchung hatte nämlich zu der Erkenntnis geführt, daß der positive Krater dieser Salzkohlen eine bei jedem Druck um so höhere Flächenhelligkeit zeigt, je größer die benutzte Stromstärke ist.

Tabelle XI.

20. Mai 1914			22. Mai 1914		
Druck in Atmosphären	Helligkeit	Abs. Temp.	Druck in Atmosphären	Helligkeit	Abs. Temp.
1	1	4200	1	1	4200
2	1,8	4500	2	2,5	4690
4	3,2	4820	4	4,4	5000
6	4,3	4980	6	6,0	5190
8	5,3	5110	8	7,8	5350
10	6,2	5200	10	9,5	5470
12	6,9	5270	12	11,0	5560
14	7,6	5330	14	12,7	5650
16	8,3	5390	16	14,2	5740
18	8,9	5430	18	15,6	5800
20	9,4	5460	20	16,8	5840
22	9,9	5500	22	18,0	5890
24	10,4	5530			
26	10,9	5560			

Die Ergebnisse der Tabelle sind in Fig. 49 als Helligkeitskurven aufgetragen. Aus diesen sind die in Fig. 50 gegebenen Temperaturkurven berechnet worden. Hier entspricht die Kurve $B' C'$ bzw. $B' D'$ der Helligkeitskurve BC bzw. BD in Fig. 49. Aus diesen Kurven ersieht man recht deutlich, wie mit jeder neuen Erkenntnis eine immer flachere Temperaturkurve erzielt worden ist, d. h. eine Kurve, bei welcher die Temperatur immer schneller mit dem Druck ansteigt. In Übereinstimmung hiermit steht die allerneueste Beobachtung einer 23fachen Flächenhelligkeit bei nur 22 Atm. Druck und einer zugehörigen Temperatur von 6090° abs.

Jedenfalls können aber schon auf Grund der bisherigen Versuche die folgenden Resultate als feststehend betrachtet werden.

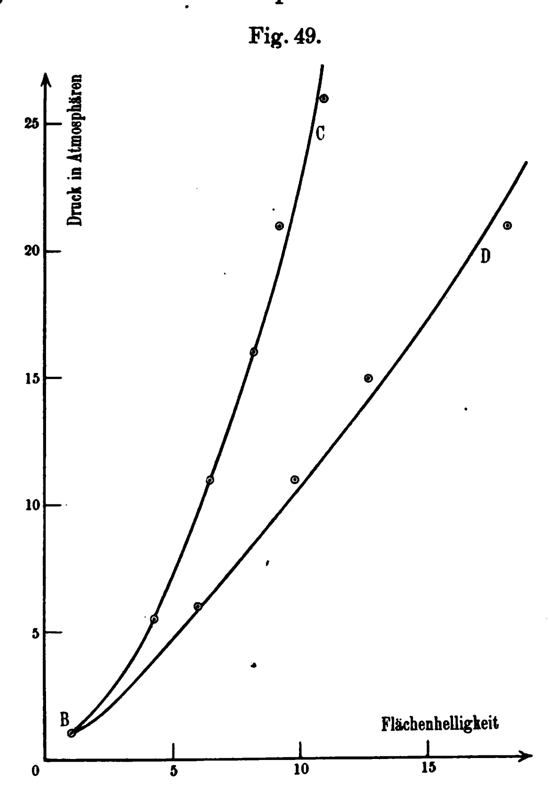
1. Die bisher erreichte höchste Temperatur des in festem Zustande verdampfenden positiven Kraters der bei 22 Atm. Überdruck gebrannten Bogenlampe bei Verwendung geeignet imprägnierter Salzkohlen ist rund 6000° abs.

2. Ist eine Extrapolation der bisher erhaltenen flachsten Temperaturkurve ($B' D'$ in Fig. 50) erlaubt, so würde der positive Krater bei einem Druck von 70 Atm. die Temperatur von rund

6500° abs. und bei einem Druck von 250 Atm. die Temperatur von rund 7000° abs. erreichen.

c) Ist durch diese Versuche die Sonnentemperatur erreicht? Um diese Frage beantworten zu können, müßten wir die wahre Temperatur der Sonne kennen. Leider ist die Bestimmung der wahren Sonnentemperatur ein bisher noch ungelöstes

Fig. 49.

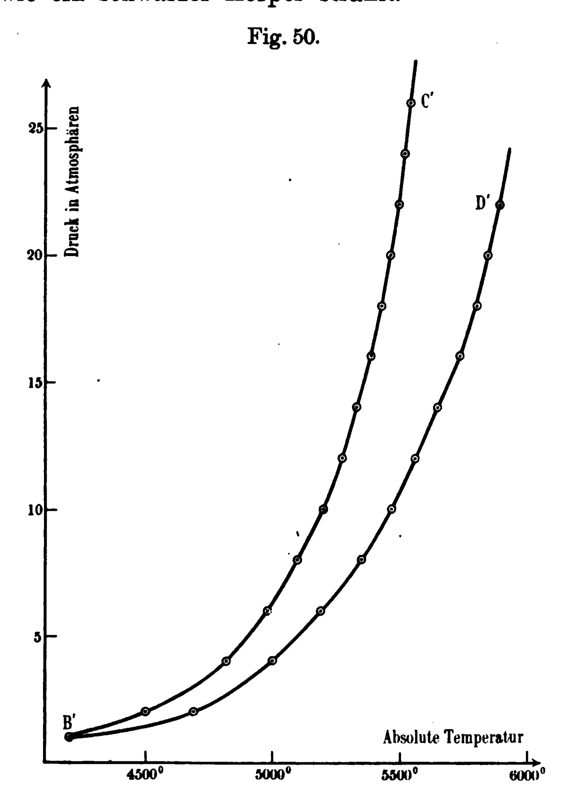


Problem. Um dies zu zeigen, wollen wir die Methoden besprechen, mit Hilfe deren man versucht hat, die Temperatur der Sonne zu bestimmen.

d) Bestimmung der „schwarzen“ Temperatur der Sonne. Unter der Voraussetzung, daß die Sonne wie ein schwarzer Körper strahlt, kann man auf die Sonnenstrahlung das Stefan-Boltzmannsche Gesetz anwenden. Dieses sagt aus, daß die Gesamtstrahlung des schwarzen Körpers proportional zur vierten

Potenz der absoluten Temperatur steigt (§ 13). Da man sehr genau die Strahlungsmenge kennt, welche die Sonne unserer Erde zusendet (die sogenannte „Solarkonstante“), so kann man mit Hilfe der Solarkonstanten unter Benutzung des Stefan-Boltzmannschen Gesetzes die „schwarze“ Temperatur der Sonne bestimmen, d. h. diejenige Temperatur, welche der Sonne zukommt, falls sie wie ein schwarzer Körper strahlt.

Fig. 50.



Bei Benutzung des neuesten Wertes dieser Solarkonstante [1]) berechnet sich die schwarze Temperatur der Sonne zu 5850° abs. mit einem Fehler von etwa 300°.

Strahlt die Sonne nicht wie ein schwarzer Körper, sondern z. B. wie blankes Platin, so erhöht sich die berechnete Temperatur

---

[1]) Abbot und Fowle, „Über den besten Wert der Solarkonstante“, Astroph. Journ. 35, 92—100 (1912).

der Sonne. Leider wissen wir nichts Bestimmtes über die Strahlungseigenschaften der Sonne.

e) Einschließung der wahren Sonnentemperatur zwischen zwei Grenzen. Ist die Annahme richtig, daß die Strahlungseigenschaften der Sonne zwischen denen des schwarzen Körpers und des blanken Platins liegen, so kann man eine zweite Methode anwenden, welche erlaubt, die wahre Temperatur zwischen zwei Grenzen einzuschließen. Diese schon im § 16 verwendete Methode beruht auf der Bestimmung der Lage des Energiemaximums im Normalspektrum unter Benutzung der folgenden von Lummer-Pringsheim experimentell bestimmten Beziehungen. Ist λ_{max} die Wellenlänge, ausgedrückt in $\mu = 0{,}001$ mm, bei welcher das Energiemaximum des schwarzen Körpers bzw. des blanken Platins von der absoluten Temperatur T im Normalspektrum liegt, so gilt:

für den schwarzen Körper: $\lambda_m \,.\, T = 2940,$
für blankes Platin: $\lambda_m \,.\, T = 2630.$

In bezug auf die Größe von λ_{max} des Energiemaximums der Sonne weichen die zuverlässigsten Beobachtungen leider noch weit voneinander ab. So soll nach Very das Energiemaximum im Normalspektrum oberhalb der Atmosphäre bei $\lambda_{max} = 0{,}53\,\mu$ liegen, nach Abbot und Fowle bei $\lambda_{max} = 0{,}43\,\mu$. Gemäß den Lummer-Pringsheimschen Beziehungen berechnet sich also hiernach die Temperatur der Sonne zu 4960° bzw. 6010° abs., wenn sie wie blankes Platin strahlt, und zu 5550° bzw. 6840° abs., wenn sie wie ein schwarzer Körper strahlt.

Wie wir sehen, liefert diese Methode im Gegensatz zu der ersten Methode die minimale Temperatur unter der Annahme, daß die Sonne sich wie ein schwarzer Körper verhält, während man den Maximalwert erhält unter der Annahme, daß die Sonne wie blankes Platin strahlt. Sollte der Mittelwert der berechneten Grenzwerte der Wahrheit am nächsten kommen, so wäre die wahre Temperatur gemäß Very ($\lambda_{max} = 0{,}53\,\mu$) gleich 5250° abs., gemäß Abbot und Fowle dagegen gleich 6430° abs. Das Mittel aus diesen beiden Werten ist 5840° abs., stimmt also merkwürdigerweise mit der nach der ersten Methode berechneten „schwarzen“ Temperatur (5850° abs.) genau überein. Und trotzdem ist dies kein Beweis dafür, daß dies die wahre Temperatur der Sonne ist. Nehmen wir gleichwohl die wahre Temperatur der

Sonne zu rund 5900° abs. an, so folgt, daß schon durch die bisherigen Versuche bei hohen Drucken der positive Krater der Bogenlampe die Sonnentemperatur mindestens erreicht hat.

f) Strahlt der bis auf die Sonnentemperatur erhitzte positive Krater Sonnenlicht aus? Diese Frage ist gleichbedeutend mit der Frage, ob der bis zur Sonnentemperatur erhitzte Kohlenkrater Licht ausstrahlt, welches die gleiche spektrale Zusammensetzung im sichtbaren Spektrum besitzt wie die Sonne. Diese Frage kann erst durch weitere Versuche über die spektrale Vergleichung des Lichtes der wahren Sonne mit dem Lichte der „künstlichen Sonnenlampe" entschieden werden.

E. Gesamtergebnisse.

Die als endgültig zu betrachtenden Resultate meiner mitgeteilten Untersuchungen sollen hier im Zusammenhang zusammengefaßt werden, und zwar der besseren Übersicht wegen in drei Gruppen. Die Resultate der ersten Gruppe beziehen sich auf das Schmelzen der Kohle und die hierbei gesammelten Erfahrungen. Die zweite Gruppe enthält die Resultate über die Bestimmung der wahren Temperatur hoch erhitzter Körper, insbesondere der Kohle in den Glühlampen und in der Bogenlampe. Die dritte Gruppe enthält die Resultate betreffend die Temperatur der unter vermindertem oder erhöhtem Druck gebrannten Bogenlampe, gipfelnd in der Verwirklichung der effektiven Sonnentemperatur.

Diese Einteilung ist dadurch gerechtfertigt, daß man die Versuche über das Schmelzen der Kohle und deren Ergebnisse als ein in sich abgerundetes Ganzes aus der Broschüre ablösen kann, ohne daß dadurch das übrige an innerem Zusammenhang und Einheitlichkeit verliert. Andererseits bauen die in der dritten Gruppe mitgeteilten Versuchsergebnisse auf denen der zweiten Gruppe auf, wenigstens soweit es sich bei denselben um quantitative Angaben handelt.

I. Resultate der ersten Gruppe von Versuchen.

1. Die Verflüssigung reinen Kohlenstoffs.
2. Die Verflüssigung „glasklarer" Diamanten.

3. Das Schmelzen des positiven Kraters der Bogenlampe in Luft, Stickstoff, Sauerstoff und Kohlendioxyd im Druckintervall von $^1/_5$ bis etwa 2 Atm.

4. Die vollkommene Selbstreinigung verschiedener Kohlensorten (Homogenkohlen) beim Brennen als positive Kohle in der Bogenlampe.

5. Die Schmelze am positiven Krater der geschmolzenen Kohlensorten ist flüssiger Kohlenstoff, das Erstarrungsprodukt ist Graphit.

6. Die Verflüssigung des positiven Kraters der in freier Luft brennenden Bogenlampe tritt nur bei Anwendung zur Kohlendicke relativ kleiner Stromstärken ein; bei Beschickung der Bogenlampe mit den in der Technik üblichen oder gar größeren Stromstärken verdampft der positive Krater in festem Zustande.

II. Resultate der zweiten Gruppe von Versuchen.

7. Die Angabe neuer Methoden, die wahre Temperatur des Glühfadens einer Glühlampe experimentell zu bestimmen und rechnerisch aus der Größe der Oberfläche des Glühfadens und aus dem Wattverbrauch zu ermitteln. Die Durchführung dieser Methode an den Glühfäden einer Platin- und Kohlenfadenglühlampe.

8. Die Feststellung des Gesamtstrahlungsgesetzes der Glühlampenkohle.

9. Die Ermittelung, daß die Kohle der Glühlampen und der Bogenlampe wenigstens im sichtbaren Spektrum wie ein grauer Körper strahlt.

10. Die Auffindung der Beziehung zwischen der Flächenhelligkeit und der wahren Temperatur der Glühlampenkohle bis zu Temperaturen von etwa 3000° abs.

11. Die Auffindung der Beziehung zwischen der wahren Temperatur des Kohlenfadens der Glühlampe und der zu seiner Erhitzung notwendigen elektrischen Energie.

12. Der Nachweis der Brauchbarkeit der Lummer-Pringsheimschen Methode, aus dem Schnittpunkt der logarithmischen Isochromaten der schwarzen Strahlung im sichtbaren Spektrum die wahre Temperatur einer „schwarzen“ oder „grauen“ Lichtquelle zu ermitteln, falls diese bei den Messungen als Vergleichslichtquelle gebraucht wird.

III. Resultate der dritten Gruppe von Versuchen.

13. Die wahre Temperatur des in festem Zustande verdampfenden Kraters der in freier Luft brennenden Bogenlampe beträgt rund 4200° abs. Der negative Krater hat für gewöhnlich eine um Hunderte Grade niedrigere Temperatur; diese kann unter geeigneten Umständen ebenfalls bis auf die Temperatur des positiven Kraters erhöht werden.

14. Es ist experimentell erwiesen worden, daß die Temperatur des in festem Zustande verdampfenden positiven Kraters mit abnehmendem Druck ($<$ 1 Atm.) kontinuierlich abnimmt und mit steigendem Druck ($>$ 1 Atm.) kontinuierlich steigt.

15. Die Temperatur der im flüssigen Kohlenteich vorhandenen, stets heller als die Flüssigkeit leuchtenden „Fische" ist vom Druck unabhängig.

16. Die bei Druckverminderung erzielte niedrigste Temperatur des in festem Zustande verdampfenden positiven Kraters beträgt etwa 3900° abs.

17. Bei Verwendung extra angefertigter, bei hohen Drucken einen stationären Bogen bildender Kohlenstäbe beträgt die bis jetzt erreichte höchste Temperatur des positiven festen Kraters etwas über 6000° abs., so daß damit die effektive Sonnentemperatur erreicht ist.

18. Die Kurven, welche die Beziehung zwischen dem Druck und der Temperatur darstellen („Temperaturkurven"), verlaufen kontinuierlich und asymptotisch, d. h. die Temperatur steigt mit wachsendem Druck immer langsamer an.

19. Die bis jetzt gewonnene flachste Temperaturkurve (Fig. 50) läßt erhoffen, daß man den positiven Krater auf eine höhere Temperatur erhitzen können wird als die effektive Sonnentemperatur.

Bisher erschienene Hefte
der
Sammlung Vieweg

Heft 1. Dr. Robert Pohl und Dr. P. Pringsheim-Berlin: *Die lichtelektrischen Erscheinungen.* Mit 36 Abbildungen. M. 3,—.

Heft 2. Dr. C. Freiherr von Girsewald-Berlin-Halensee: *Peroxyde und Persalze.* M. 2,40.

Heft 3. Diplomingenieur Paul Béjeuhr-Charlottenburg: *Der Blériot-Flugapparat und seine Benutzung durch Pégoud vom Standpunkte des Ingenieurs.* Mit 26 Abbildungen. M. 2,—.

Heft 4. Dr. Stanislaw Loria-Krakau: *Die Lichtbrechung in Gasen als physikalisches und chemisches Problem.* Mit 3 Abbildungen und 1 Tafel. M. 3,—.

Heft 5. Professor Dr. A. Gockel-Freiburg i. d. Schweiz: *Die Radioaktivität von Boden und Quellen.* Mit 10 Abbildungen. M. 3,—.

Heft 6. Ingenieur D. Sidersky-Paris: *Brennereifragen: Kontinuierliche Gärung der Rübensäfte. — Kontinuierliche Destillation und Rektifikation.* Mit 24 Abbildungen. M. 1,60.

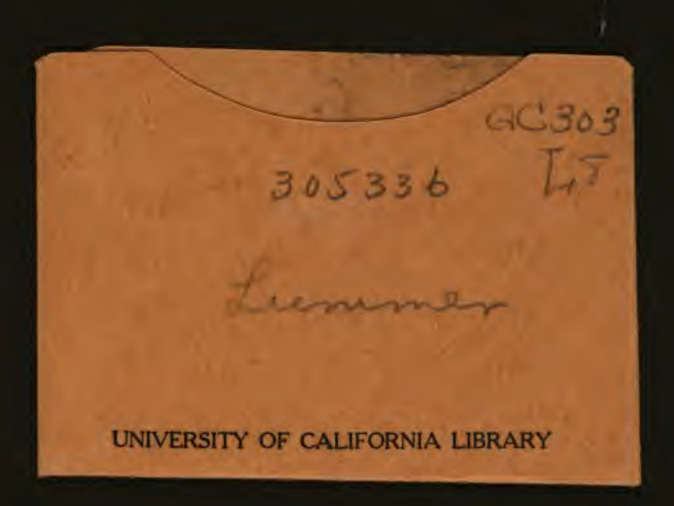
Heft 7. Hofrat Professor Dr. Ed. Donath und Dr. A. Gröger-Brünn: *Die flüssigen Brennstoffe, ihre Bedeutung und Beschaffung.* Mit 1 Abbildung. M. 2,—.

Heft 8. Geh. Reg.-Rat, Professor Dr. Max B. Weinstein-Berlin: *Kräfte und Spannungen. Das Gravitations- und Strahlenfeld.* M. 2,—.

Heft 9/10. Geh. Reg.-Rat, Professor Dr. O. Lummer-Breslau: *Verflüssigung der Kohle und Herstellung der Sonnentemperatur.* Mit 50 Abbildungen. M. 5,—.

Heft 11. Dr. E. Przybyllok: *Polhöhen-Schwankungen.* Mit 8 Abbildungen. M. 1,60.

Heft 12. Professor Dr. Albert Oppel-Halle a. S.: *Gewebekulturen.* Mit 32 Abbildungen. M. 3,—.


QC303
305336
L5
Lemmer
UNIVERSITY OF CALIFORNIA LIBRARY